

超高速電子顕微鏡用のRF電子銃の開発

Development of rf gun for ultrafast electron microscopy

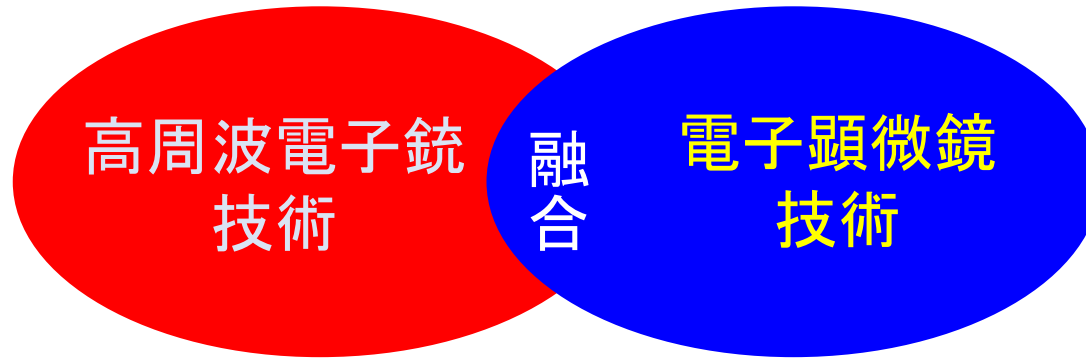
◎楊金峰^{A)}, 菅晃一^{A)}, 高富俊和^{B)}, 樊寛軍^{C)}, 照沼信浩^{B)},
浦川順治^{B)}, 吉田陽一^{A)}

^{A)}大阪大学産業科学研究所

^{B)}高エネルギー加速研究機構

^{C)}華中科技大学

研究背景



小型・超高圧・時間分解電顕



実時間・実空間での観察

*** フェムト秒時間・原子分子スケールの動画撮影技術 ***

(物質・材料科学者の長年の夢)

フェムト秒時間分解MeV電子線回折装置

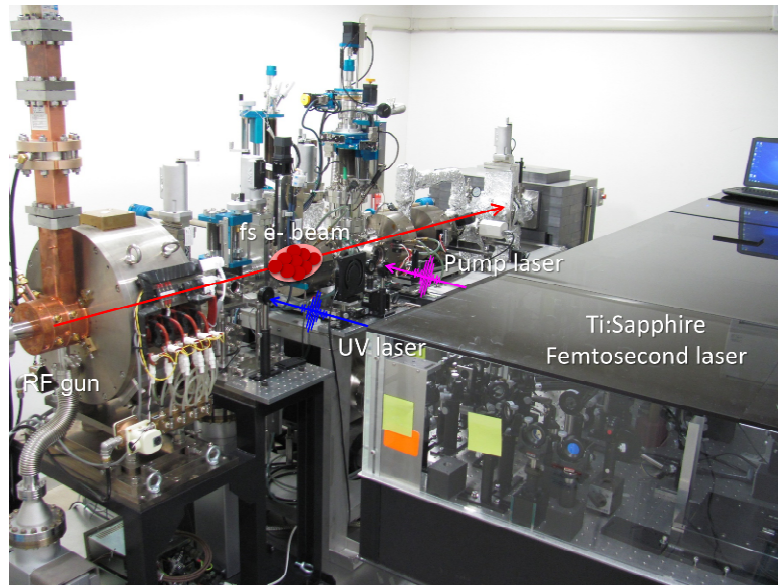
本装置は、エネルギーが1~3MeVのフェムト秒電子線パルスを用いた電子回折によるフェムト秒時間領域での結晶構造ダイナミクスを測定可能な装置である。

電子線エネルギー	1 ~ 3 MeV
時間分解能	100 fs
空間分解能	0.02 Å ⁻¹



フェムト秒時間分解電子線回折装置

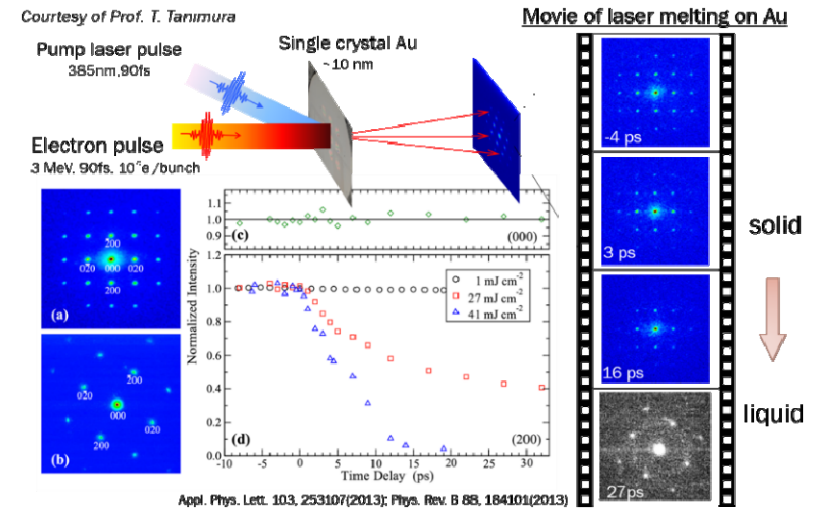
(大阪大学)



応用展開:

金単結晶のレーザー溶融ダイナミクスの測定例

時間分解能: 150fs

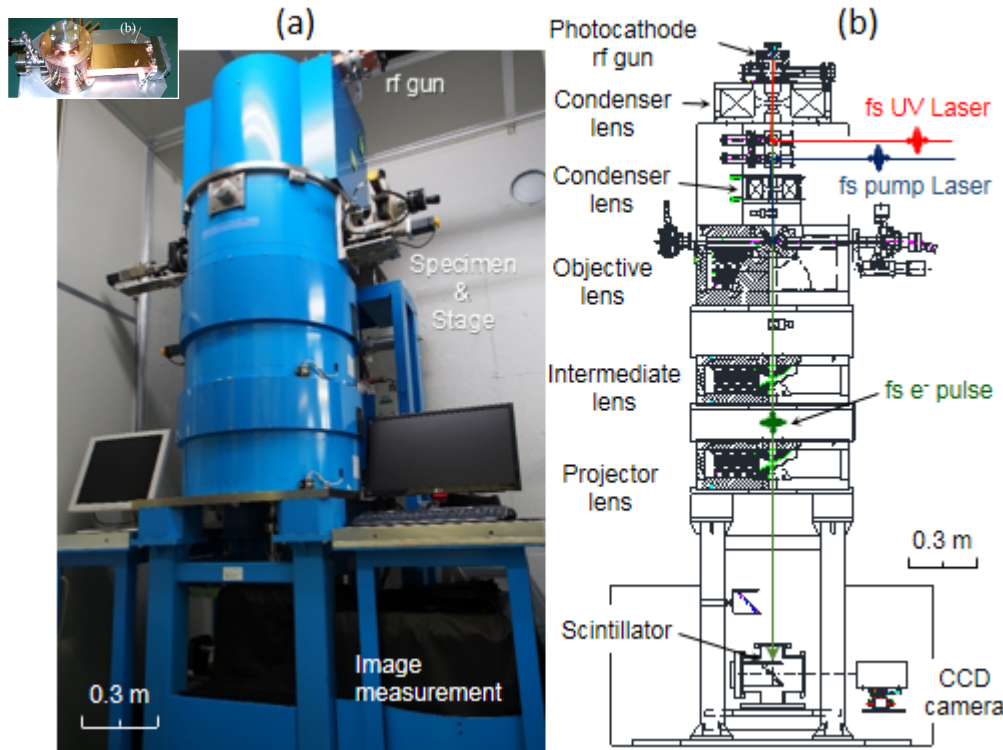


Single-shot電子線回折の観察、時間分解の測定も可能!

フェムト秒時間分解電子顕微鏡の実証実験

フェムト秒時間分解電子顕微鏡の実証機

100 fs, 3.1 MeV, 1pC/pulse

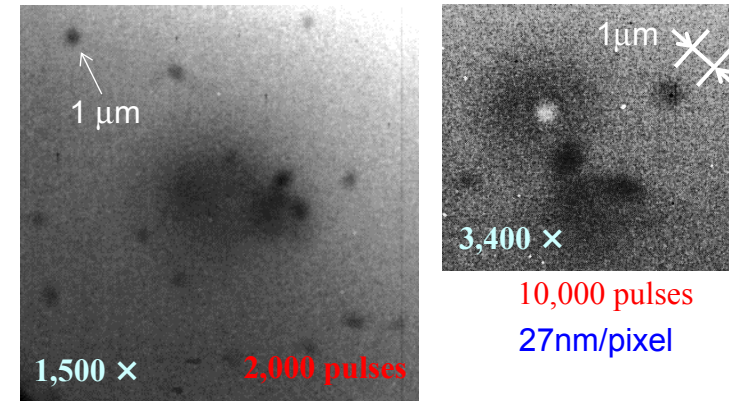


- ✓ RF電子銃: KEKとの共同研究で開発
- ✓ 電子レンズ: 自作

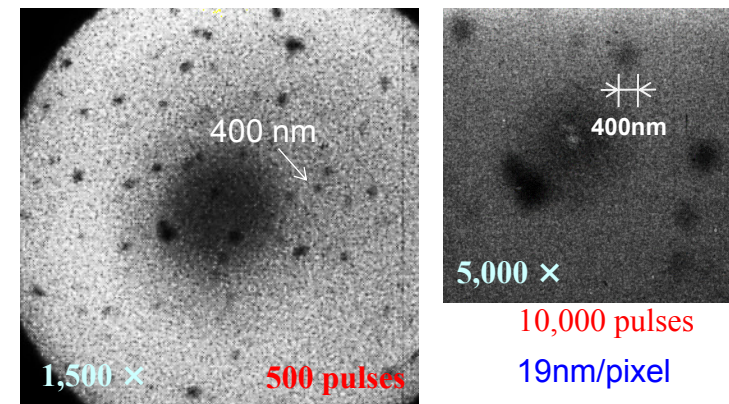
目標: 空間分解能、10nm
時間分解能、100fs

TEM images using fs e- pulses

1.09- μm -diameter polystyrene latex particles



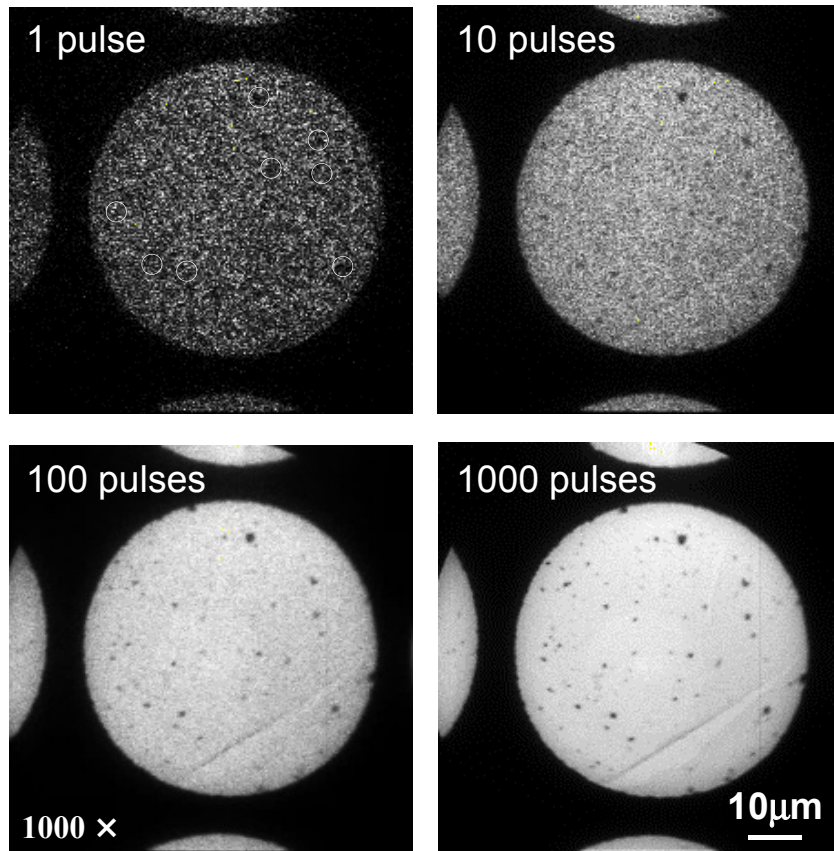
400-nm-diameter gold nanoparticles



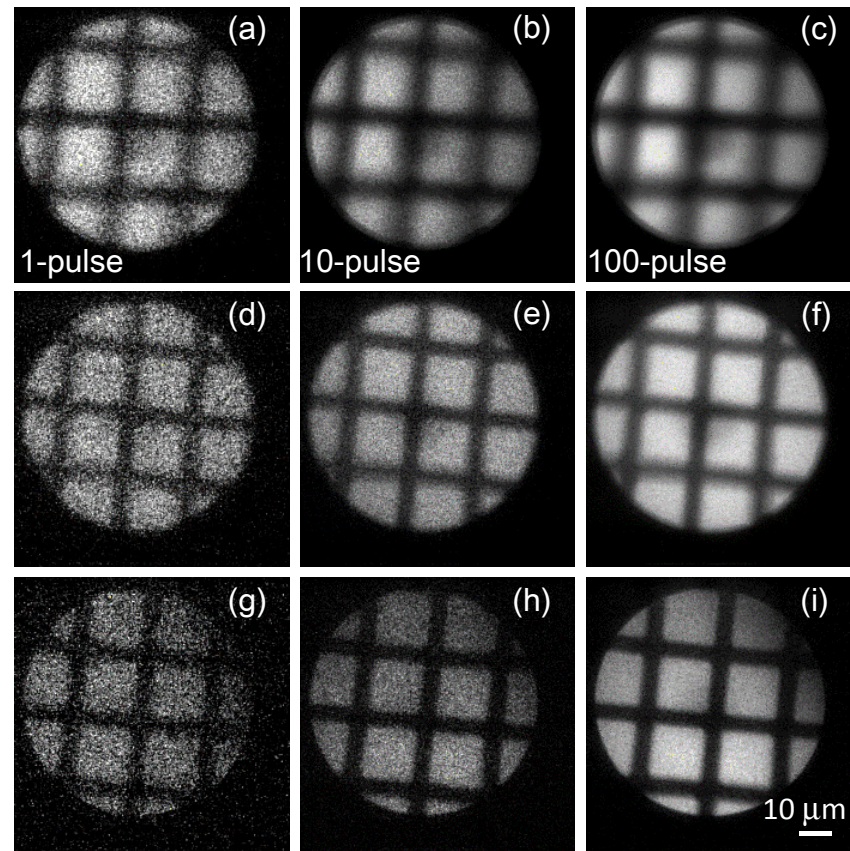
RF電子銃を用いた電子顕微鏡の可能性が示されたが、目標の分解能は未達成。

問題点： 電子数とエミッタンス(エネルギー分散)

400-nm-diameter gold nanoparticles
100 fs, 3.1 MeV, 1pC/pulse



1000-mesh thin bar copper grid
100 fs, 3.1 MeV, 1pC/pulse



normalized
emittance
(mm-mrad)



0.7

0.3

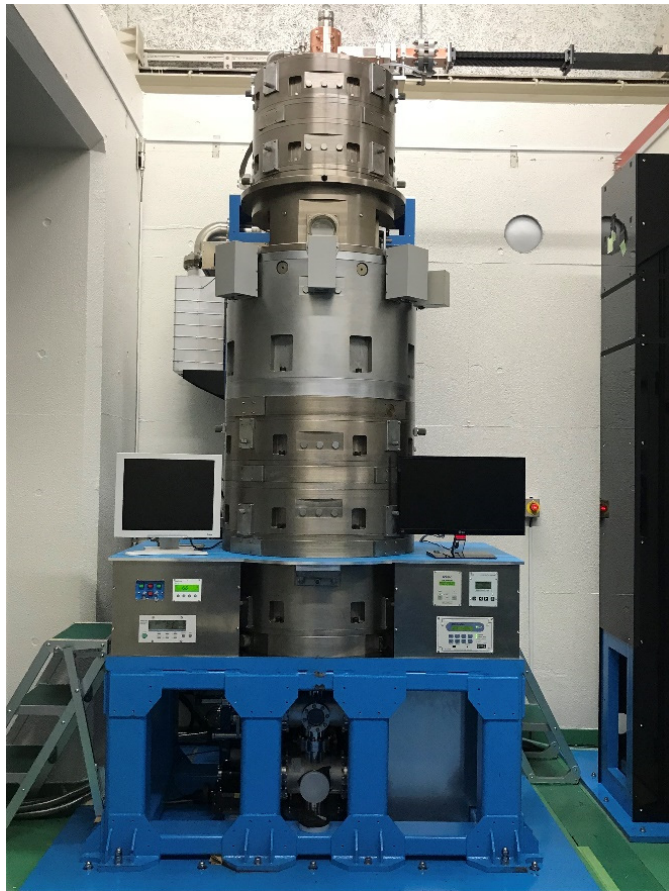
0.12

電子数の増加、エミッタンス(エネルギー分散)の低減が必要不可欠！

フェムト秒時間分解超高压電子顕微鏡

相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた超高速・超高压電子顕微鏡 (since 2017)

フェムト秒時間分解電子顕微鏡



- ✓ RF電子銃: KEKとの共同研究で新たなRFガンを開発
- ✓ 電子レンズ: 1970年に日立製作所が製作したものを活用

目標:

電子線エネルギー	3 MeV
時間分解能	100 fs
空間分解能	1 nm



高輝度のRF電子銃が必要不可欠

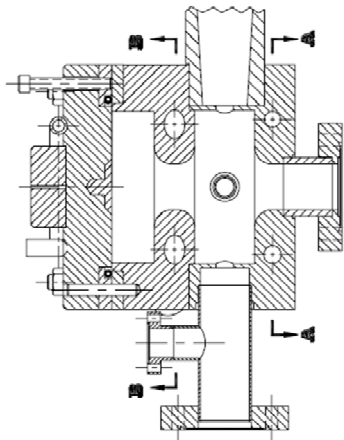
$$B = \frac{Q \cdot f}{\varepsilon^2}$$

- 高性能 $\varepsilon=0.02$ mm-mrad, $\Delta E/E=10^{-5}$
($Q=0.1$ pC/pulse)
- 高繰返し $f=10$ Hz \rightarrow 1 kHz

今までのRF電子銃の開発

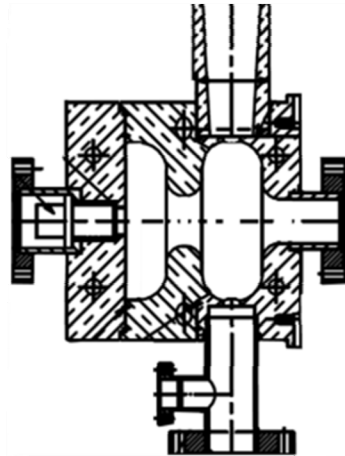
Optimization of RF cavities

BNL gun-IV



Racetrack shape
(before 2007)

KEK-type

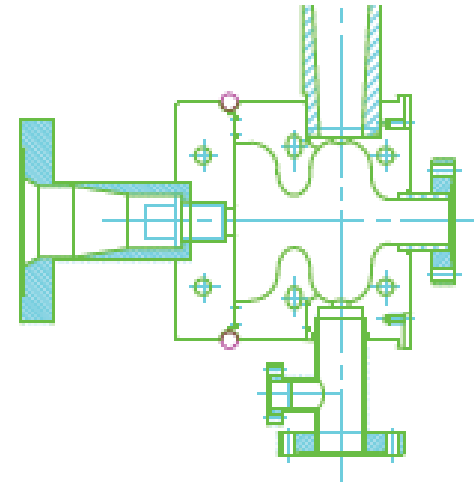


Circular shape
(in 2010)

- ✓ Increasing Q value
increase E_0
- ✓ Cathode is removable

New-type gun

under collabor. Osaka Univ. & KEK



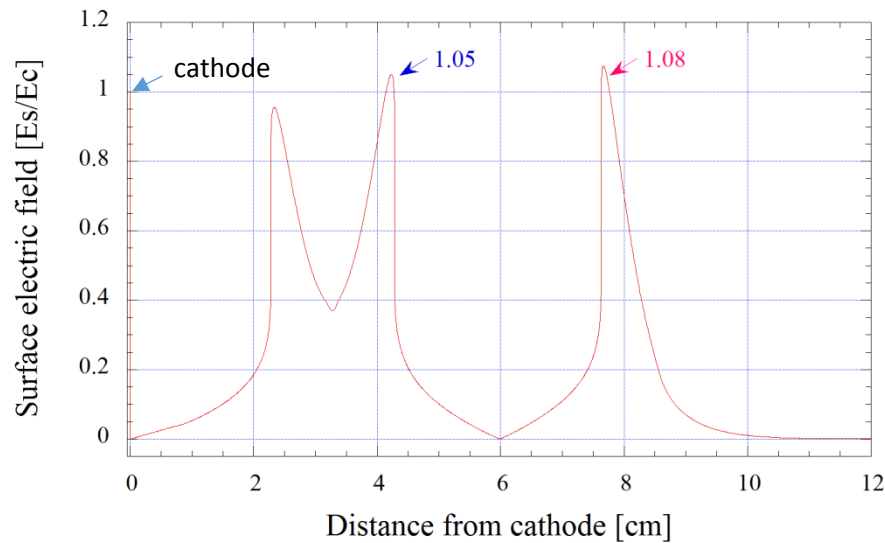
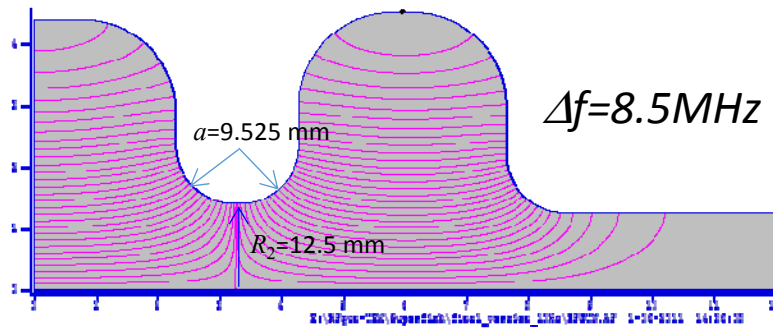
Elliptical shape
(in 2014)

- ✓ Reducing nonlinear fields
(nonlinear distortion of phase-space in bunch)
- ✓ Reducing $\Delta E/E$ in bunch
- ✓ Decreasing surface fields
10 Hz 1kHz

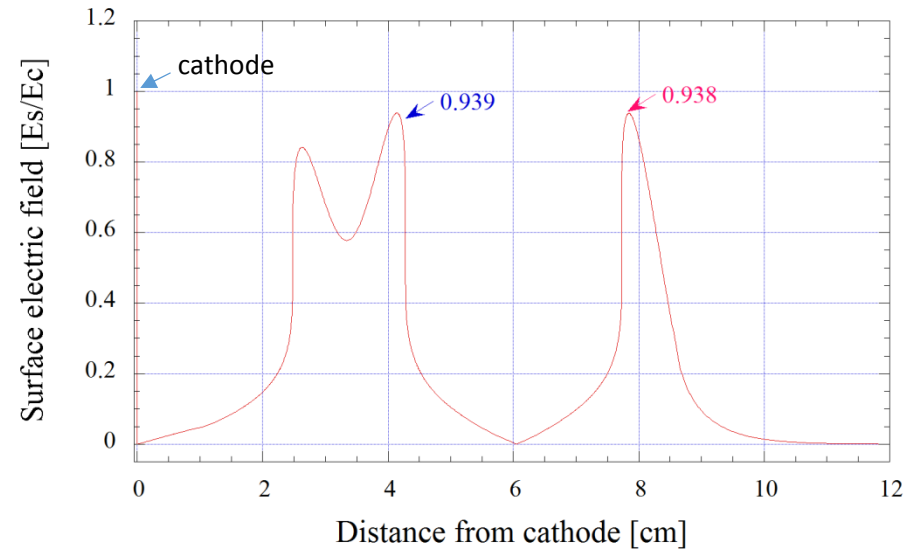
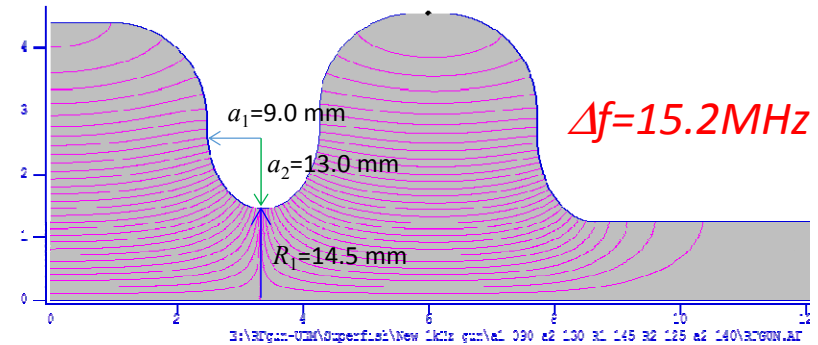
RF電子銃の最新構造

- 1) Increasing the mode separation, $\Delta f = f_{\pi} - f_0$
- 2) Decreasing the surface fields for increasing the repetition rate

KEK-type



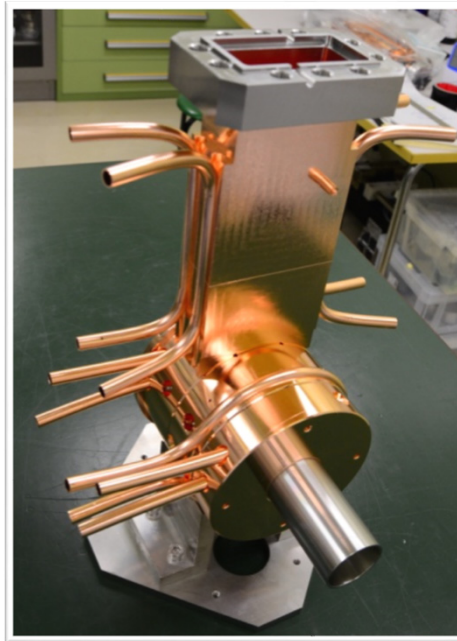
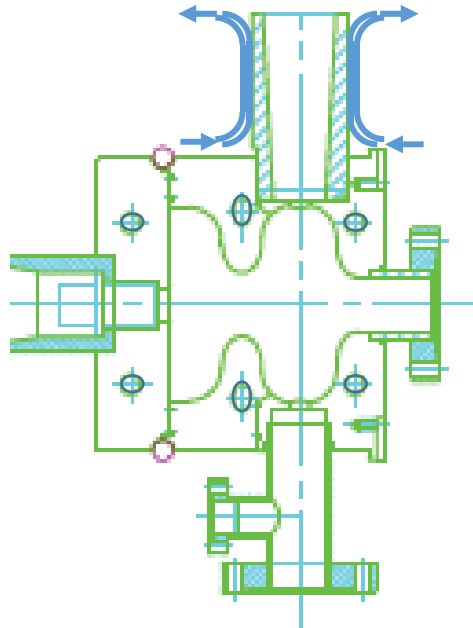
New-type gun



Decreasing the surface field → possibility to increase repetition rate

1kHzのRF電子銃

developed under collaboration of Osaka Univ. & KEK



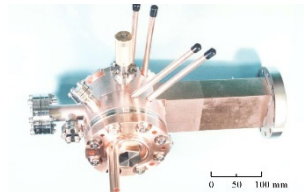
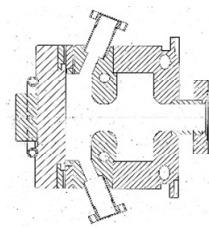
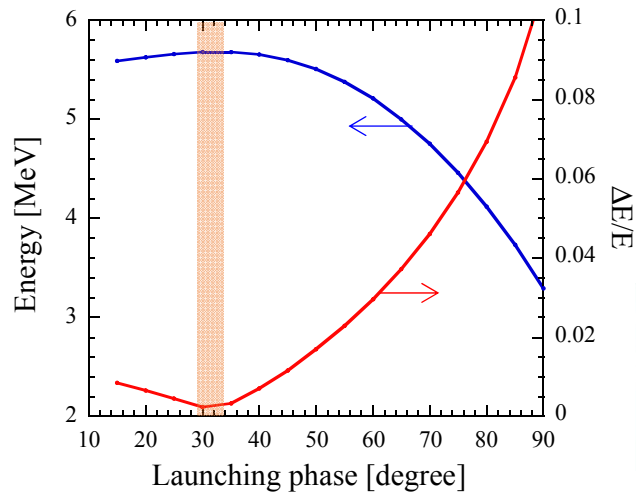
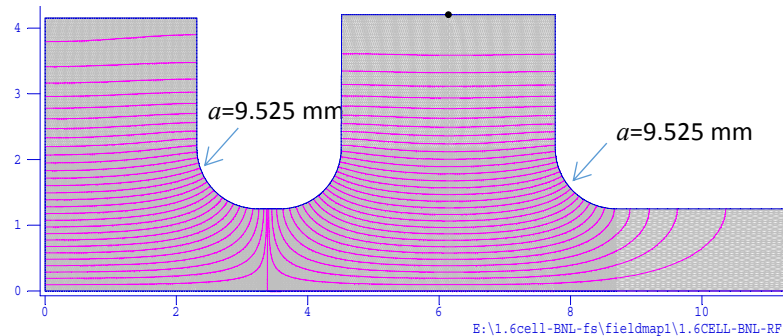
- The RF cavities are cooled with 4 channels.
- The coupling waveguide is also cooled.
- The cathode will be cooled in the future.



The RF gun is expected to be operated at 1 kHz in future.

1.6セルRF電子銃の特徴と問題点

BNL-GUN IV (1.6-cell)



◆ 1.6セルRF電子銃の特徴:

ビームエネルギー 高い
エミッタンス 低い

◆ 1.6セルRF電子銃の問題点:

RF加速位相の最適値 $\approx 30^\circ$

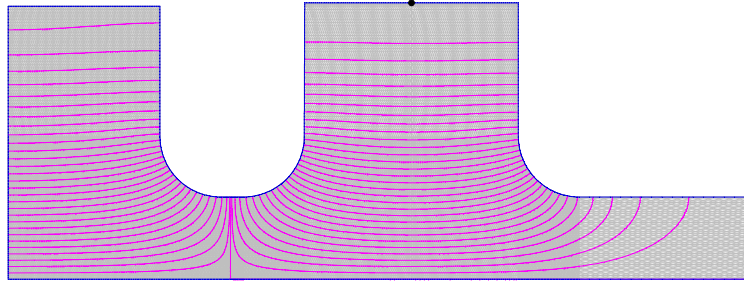
↓ $\sin 30^\circ = 0.5$

有効な加速勾配 $1/2$

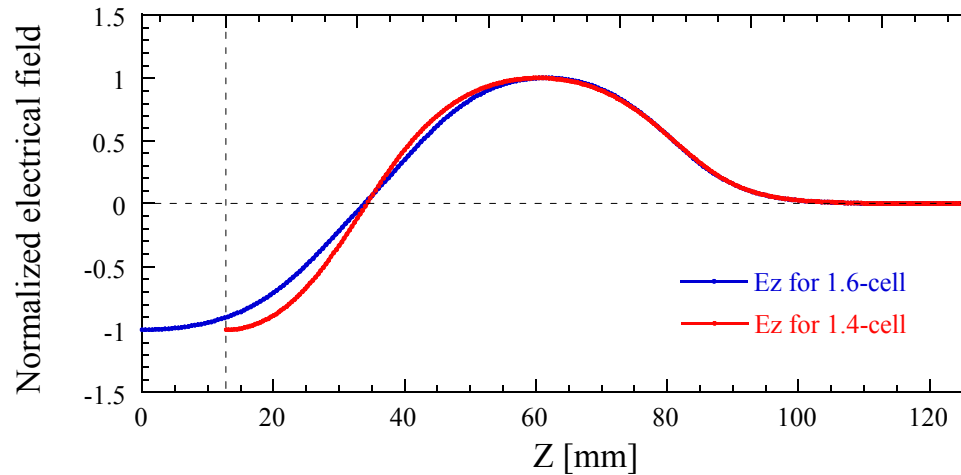
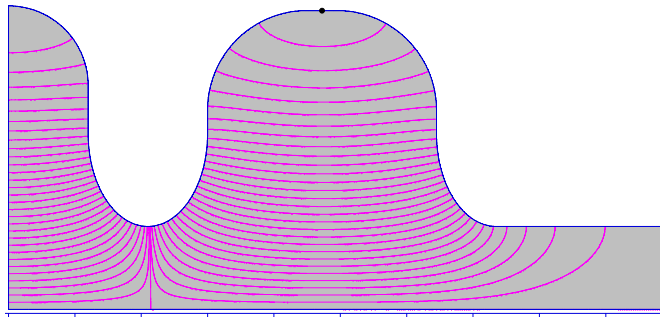
高繰返し化に不利!

なぜ、1.4セルRF電子銃？

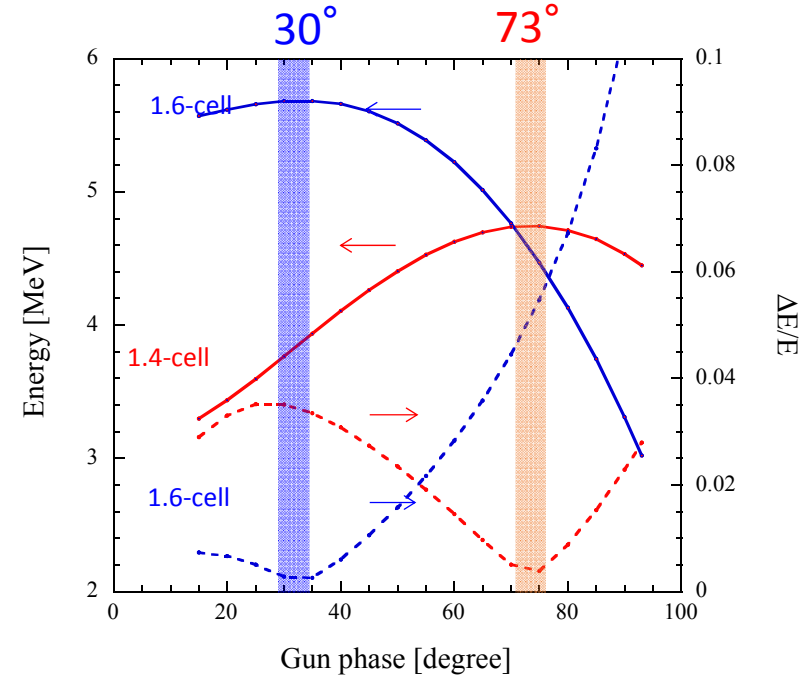
1.6-cell



1.4-cell



Laser: 10 ps FWHM, 0.3 mm FWHM; $E_0 = 120$ MV/m



◆ 1.4セルRF電子銃:

RF加速位相の最適値 = 73°



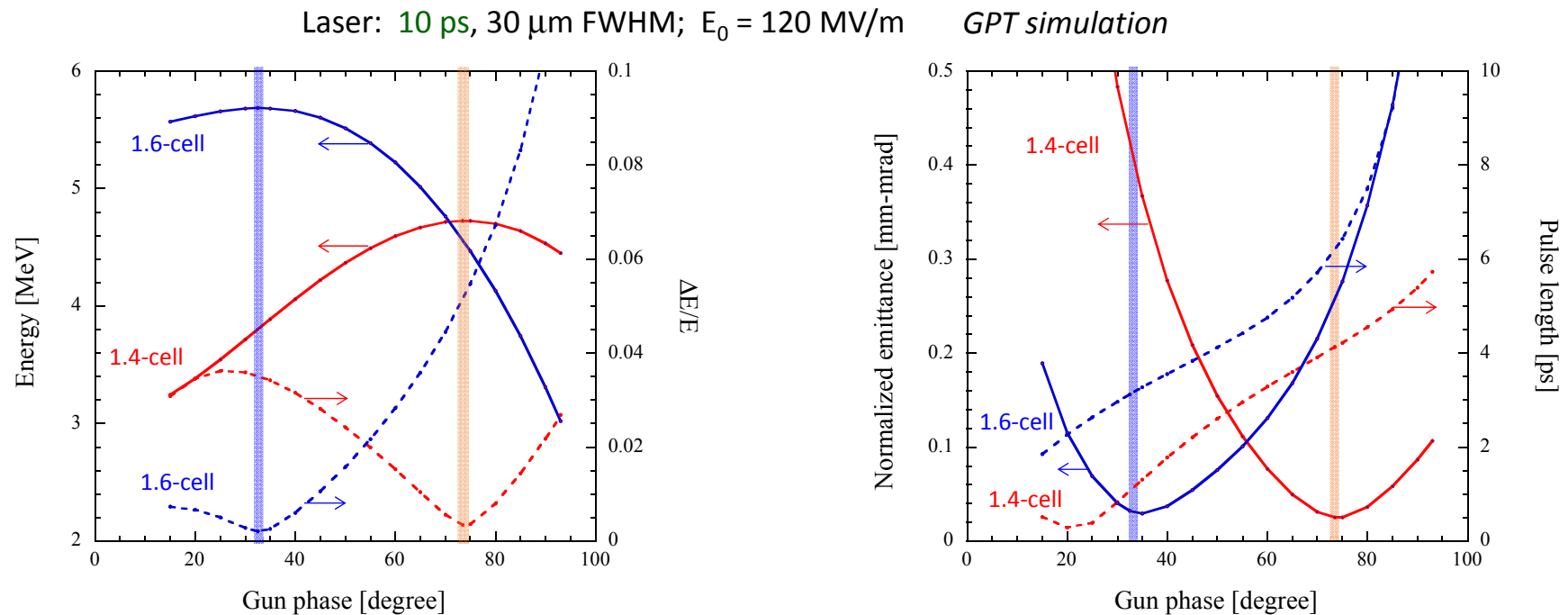
$$\sin 73^\circ = 0.96$$

有効な加速勾配 1

高繰返し化には有利。

1.4と1.6セルの電子銃性能の比較

◆ 極低エミッタンスのピコ秒電子線パルス発生の場合 (1.6 pC/pulse)



1.6-cell BNL gun (32.5°):

$E=5.7 \text{ MeV}$, $\Delta E/E=2.1 \times 10^{-3}$, $\epsilon=0.032 \text{ mm-mrad}$, $\sigma_t=3.1 \text{ ps}$, $Q=1.6 \text{ pC/pulse}$

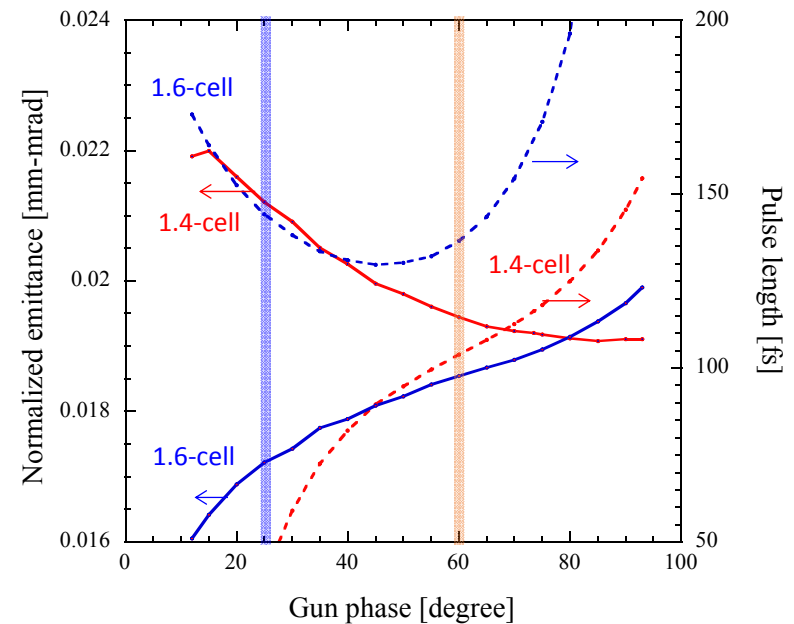
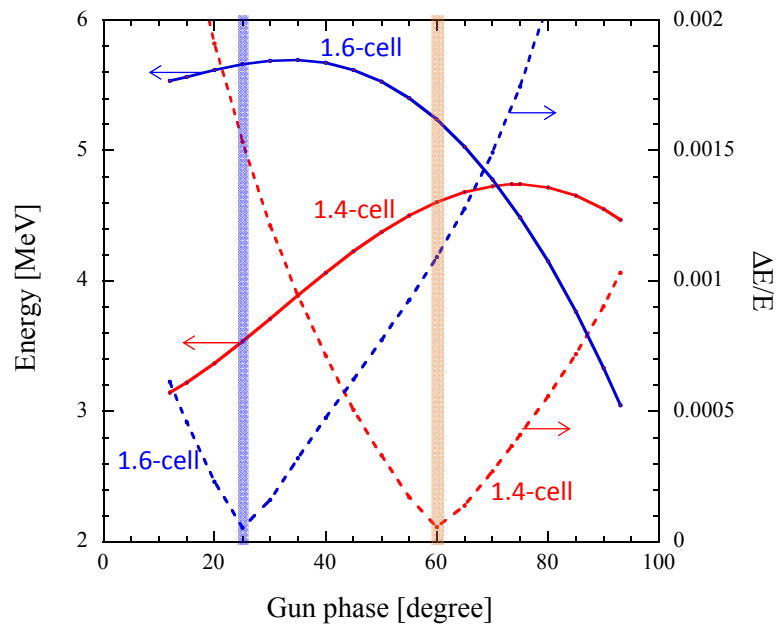
1.4-cell BNL gun (73.5°):

$E=4.7 \text{ MeV}$, $\Delta E/E=3.4 \times 10^{-3}$, $\epsilon=0.025 \text{ mm-mrad}$, $\sigma_t=4.1 \text{ ps}$, $Q=1.6 \text{ pC/pulse}$

1.4と1.6セルの電子銃性能の比較

◆ 極低エミッタンスのフェムト秒電子線パルス発生の場合 (0.1 pC/pulse)

Laser: 100 fs, 30 μm FWHM; $E_0 = 120$ MV/m



1.6-cell BNL gun (25°):

$E=5.7$ MeV, $\Delta E/E=5.5 \times 10^{-5}$, $\epsilon=0.017$ mm-mrad, $\sigma_t=144$ fs, $Q=0.1$ pC/pulse

1.4-cell BNL gun (60°):

$E=4.6$ MeV, $\Delta E/E=5.7 \times 10^{-5}$, $\epsilon=0.019$ mm-mrad, $\sigma_t=104$ fs, $Q=0.1$ pC/pulse

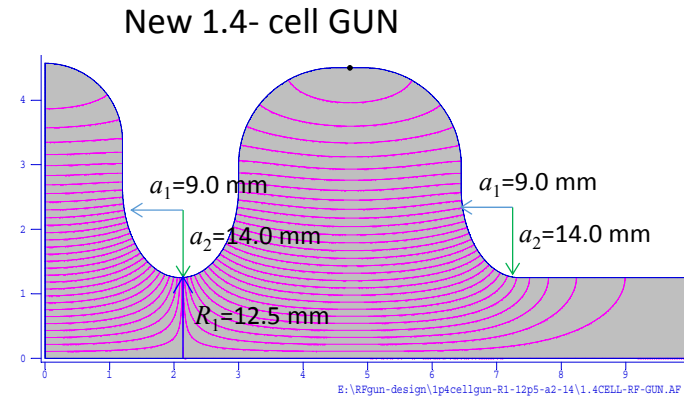
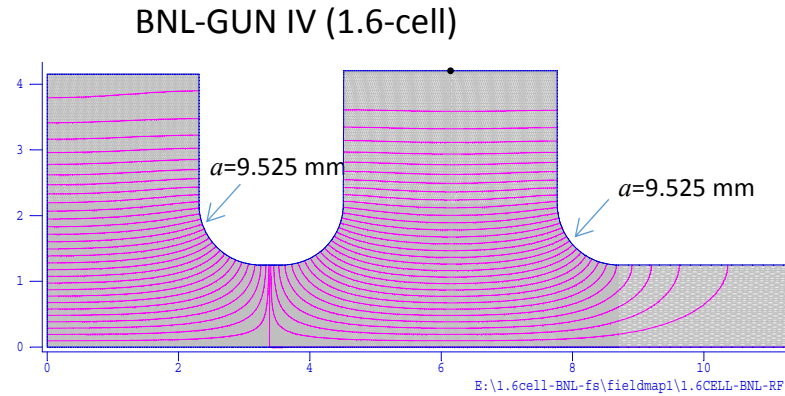
1.4セルの電子銃性能のまとめ

Parameter	1.6-cell BNL-GUN IV	1.4-cell New-Gun
最適なRF位相 [degree]	25 ~ 35	60 ~ 75
エネルギー [MeV]	5.7	4.7
パルス幅	3 ps for 10-ps UV laser	4 ps for 10-ps UV laser
	144 fs for 100-fs UV laser	104 fs for 100-fs UV laser
エミッタンス [mm-mrad]	0.03 at 1.6 pC (ps-UV pulse) 0.02 at 0.1 pC (fs-pulse)	
エネルギー分散	2 ~ 3 x 10 ⁻³ (ps-UV pulse) 5 ~ 6 x 10 ⁻⁵ (fs-UV pulse)	

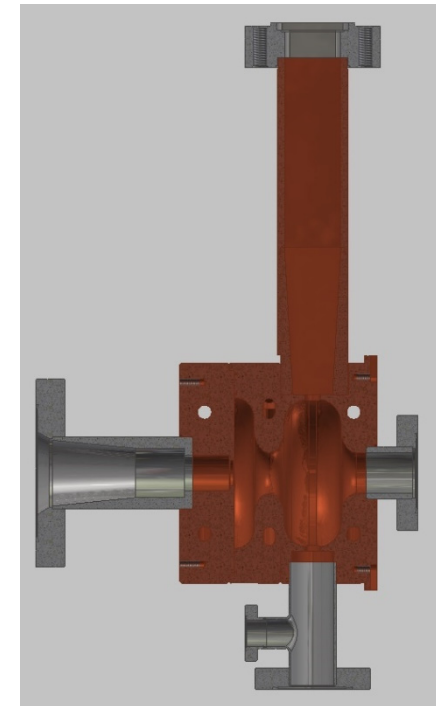
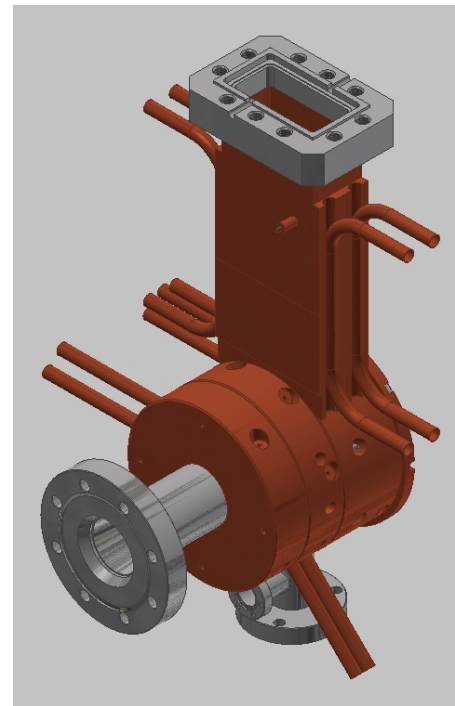
1.4セルRFガンの利点:

- 高いRF位相でも、同等性能の電子ビームが発生可能。
- 高繰返し化につなぐ → 1kHzのRF電子銃の実現。

Superfishの計算結果と構造設計



Parameter	BNL-GUN IV (1.6-cell)	New-Gun (1.4-cell)
$f_{\pi} - f_0$, [MHz]	3.5	10.9
Q	15915	16133
R_s , [M Ω /m]	48	44
E_f/E_c	1	1

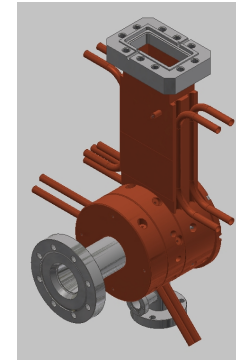


まとめ／今後の課題

1.4セルRF電子銃の設計・製作:

設計: 完了

製作: 8月～、1月に製作完了予定



電子顕微鏡の開発

- レンズ、絞り、試料の制御、
- TEM像の記録ソフトの制作、
- 1.6セルRFガンによる運転実験、
- 1.4セルRFガンの切り替え、
- 1kHzの高繰返し化、
- ...

