

2021年11月2日 KEK加速器セミナー

市販のグリッド付き熱カソードを用いた  
低エミッタンス電子銃の開発

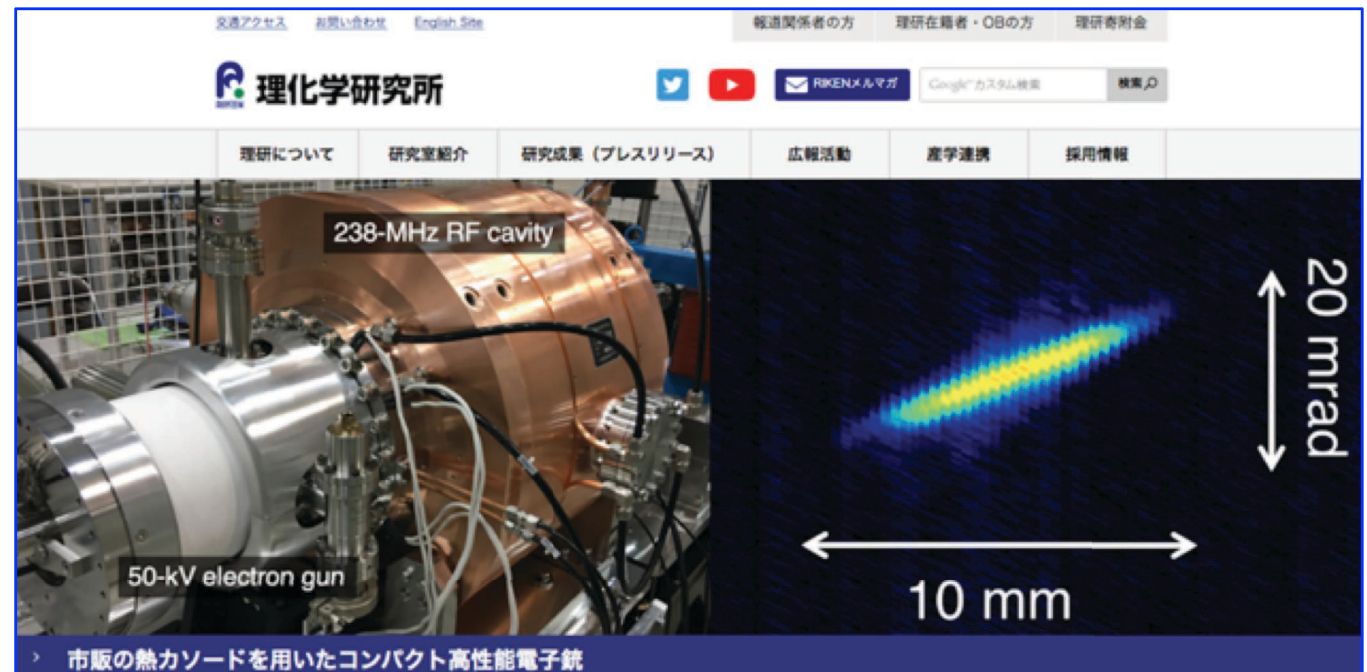
安積 隆夫

量子科学技術研究開発機構 次世代放射光施設整備開発センター

# 発表内容

- ▶ グリッド付き熱カソードを用いた電子銃の開発
  - ・ 現状の高輝度電子銃（低エミッタンス電子銃）を踏まえた本研究の背景
  - ・ グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンスRF電子銃の概要
  - ・ シミュレーション、設計、製作
  - ・ 実証試験のためのテストスタンド構築
  - ・ ビーム試験内容、試験結果
- ▶ 連続可変ビームコリメータ
- ▶ 次世代放射光施設3GeV線型加速器
  - ・ プロトタイプ線型加速器（ニュースバル1 GeV入射器）
- ▶ まとめ

▼ 2020年6月 理化学研究所HPバナーに掲載



# 従来型熱電子銃と低エミッタンス電子銃

---

衝突型加速器、放射光源のための蓄積リングでは、電子入射器として線型加速器が用いられる。その線型加速器では、保守性・操作性に優れたグリッド付き熱電子銃（1 nC / ~ 20 mm mrad）が長年使用されてきた。

近年、低エミッタンス電子ビーム生成可能な線型加速器が要請される。

▶ 線型加速器をベースとするX線自由電子レーザー

▶ 高輝度・低エミッタンス蓄積リングのための高品質ビーム生成可能な入射器

※ 線形加速器で得られる（断熱減衰後の）エミッタンスは、電子銃でのビーム生成時エミッタンスに強く依存する。

高輝度・低エミッタンス電子銃（0.5 ~ 1 nC / < 2 mm mrad）

▶ 光陰極型RF電子銃（1.6セルBNL型、…）

▶ 熱カソード（単結晶CeB<sub>6</sub>）500kV電子銃（XFEL施設SACLA）

※ グリッド付き熱カソードは、グリッドメッシュによる電場歪みがエミッタンス悪化要因とされたため、低エミッタンス電子銃には不向きとされた。

# 低エミッタンス電子銃の課題

---

## 共用施設の加速器運用の観点から

数週間の連続運転がおこなわれる加速器利用施設（高エネルギー実験、放射光利用実験）では、電子銃から生成されるビームは、長期間にわたって極めて安定であることが不可欠である。また、カソードが長寿命であること、電子銃システム（周辺設備）の高信頼性・高保守性が要求される。

### ▶ 光陰極型RF電子銃

極端紫外波長領域の短パルス高出力レーザーの利用

→ 高度に安定化されたレーザーシステムのためのインフラ設備（防振、環境温度・湿度管理）

→ レーザー専門家の常駐

### ▶ SACLA熱カソード（ $\phi 3$ mm、単結晶CeB<sub>6</sub>）500 kV電子銃（高安定、長寿命）

500 kV高電圧パルス発生装置

→ 大型・大電力装置の使用

以上の点が、製作・維持・管理コストにおいて課題となっている。

取扱いが容易であり、信頼性、保守性、堅牢性（長寿命）に優れ、製作・維持・管理コストも配慮した、低エミッタンス電子銃を検討。

→ グリッド付き熱カソード（EIMAC社製Y-845）に着目



# 市販品 (EIMAC社製Y-845) のエミッタンス評価

## ▶ 規格化熱エミッタンス

$$\varepsilon_{n,T} = \frac{r_b}{2} \sqrt{\frac{k_B T_c}{mc^2}} \approx 0.92 \text{ mm mrad}$$

## ▶ 環境磁場 (地磁気) による磁気エミッタンス

$$\varepsilon_{n,B} = \frac{eB_0 r_b^2}{2mc} \approx 0.23 \text{ mm mrad}$$

## ▶ 陰極表面粗さによるエミッタンス

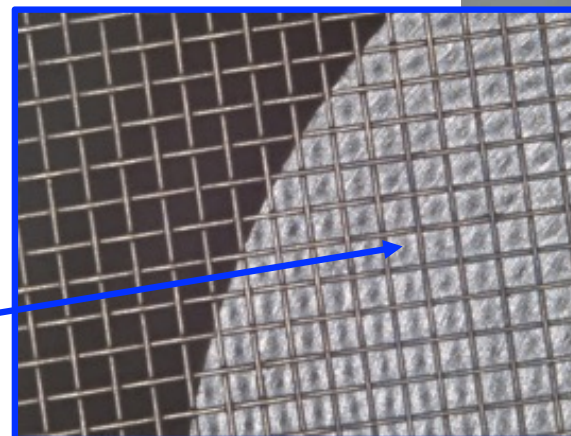
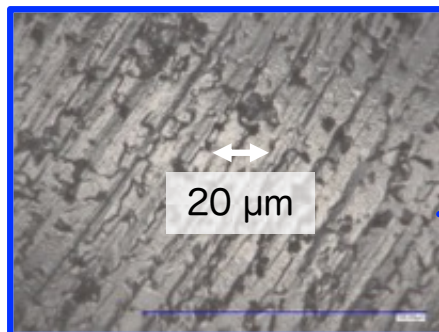
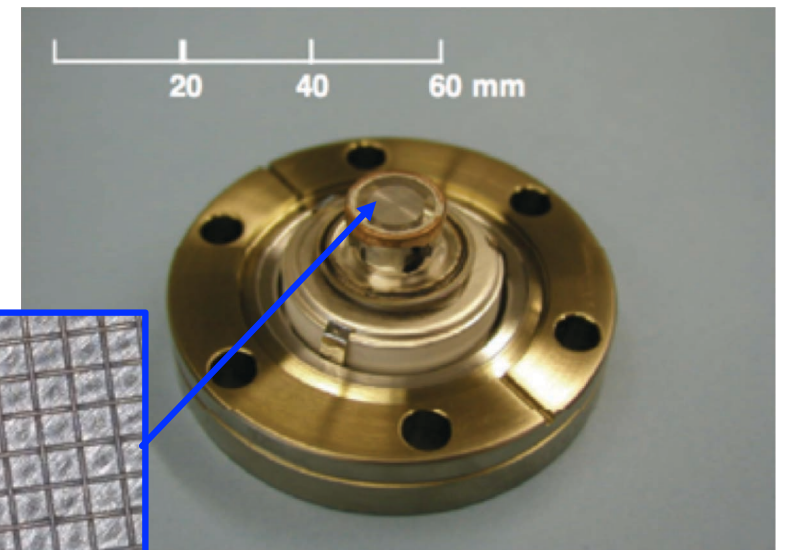
$$\varepsilon_{n,R} = \frac{\pi h}{2l} r_b \sqrt{\frac{eE_c h}{2mc^2}} \approx 0.34 \text{ mm mrad}$$

以上の効果を考慮した熱カソードの規格化エミッタンス

$$\sqrt{\varepsilon_{n,T}^2 + \varepsilon_{n,B}^2 + \varepsilon_{n,R}^2} \approx 1 \text{ mm mrad}$$

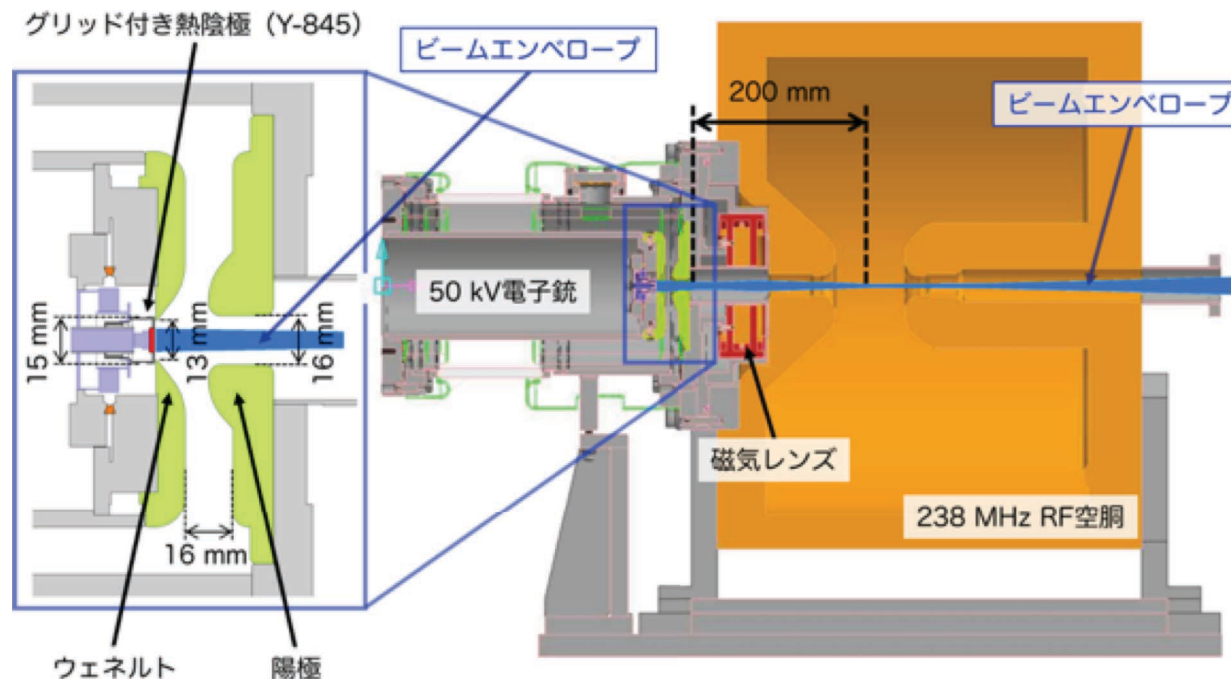
## Y-845のパラメータ

熱陰極		Ba含浸型	
熱陰極	半径	$r_b$	4 mm
熱陰極	温度	$T_c$	1270 K
地磁気		$B_0$	0.5 G
熱陰極	表面粗さ (深さ)	$h$	1 $\mu\text{m}$
熱陰極	表面粗さ (間隔)	$l$	20 $\mu\text{m}$
熱陰極	電界強度	$E_c$	-1.2 MV/m



# グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンスRF電子銃の概要

- ▶ 市販のグリッド付き熱カソード（EIMAC社製Y-845）を使用
  - ➔ グリッド・カソード間への高速パルス電圧印加により、600psのビームパルスの生成
  - ※ グリッド近傍の電場歪みによるエミッタンス増大を抑えることが必須
- ▶ アノード・カソード間の電圧は、50 kVの低電圧設定（大型・大電力装置が不要 ➔ 保守性、低コスト）
- ▶ 50 kV電子銃から生成されるビームパルスをRF空洞で直ちに500 keVまで加速
  - ➔ 空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制
  - ※ 電子銃出口とRF空洞ギャップまでの距離を可能な限り短縮
- ▶ 50 keVビーム発散を抑え、横方向分布の一様性を維持しながら、RF空洞へビーム輸送
  - ➔ 狭小磁場生成可能な磁気レンズを導入

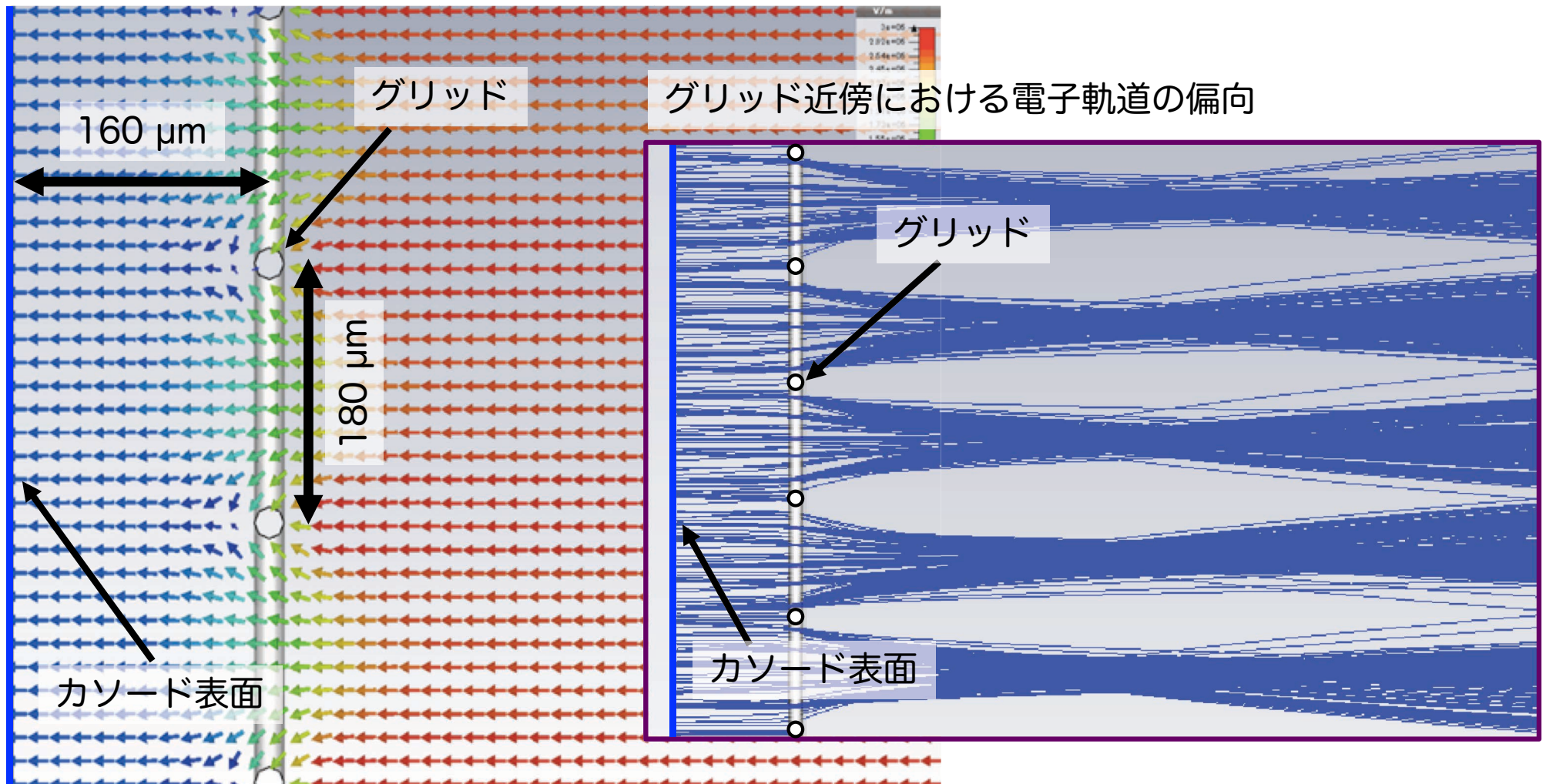


# グリッドメッシュによるエミッタンスの悪化

グリッド近傍の電場歪みが、通過する電子に横方向キックを付与（レンズ効果）

→ 横方向運動量の増大、エミッタンス悪化

カソード・グリッド周辺の電場分布



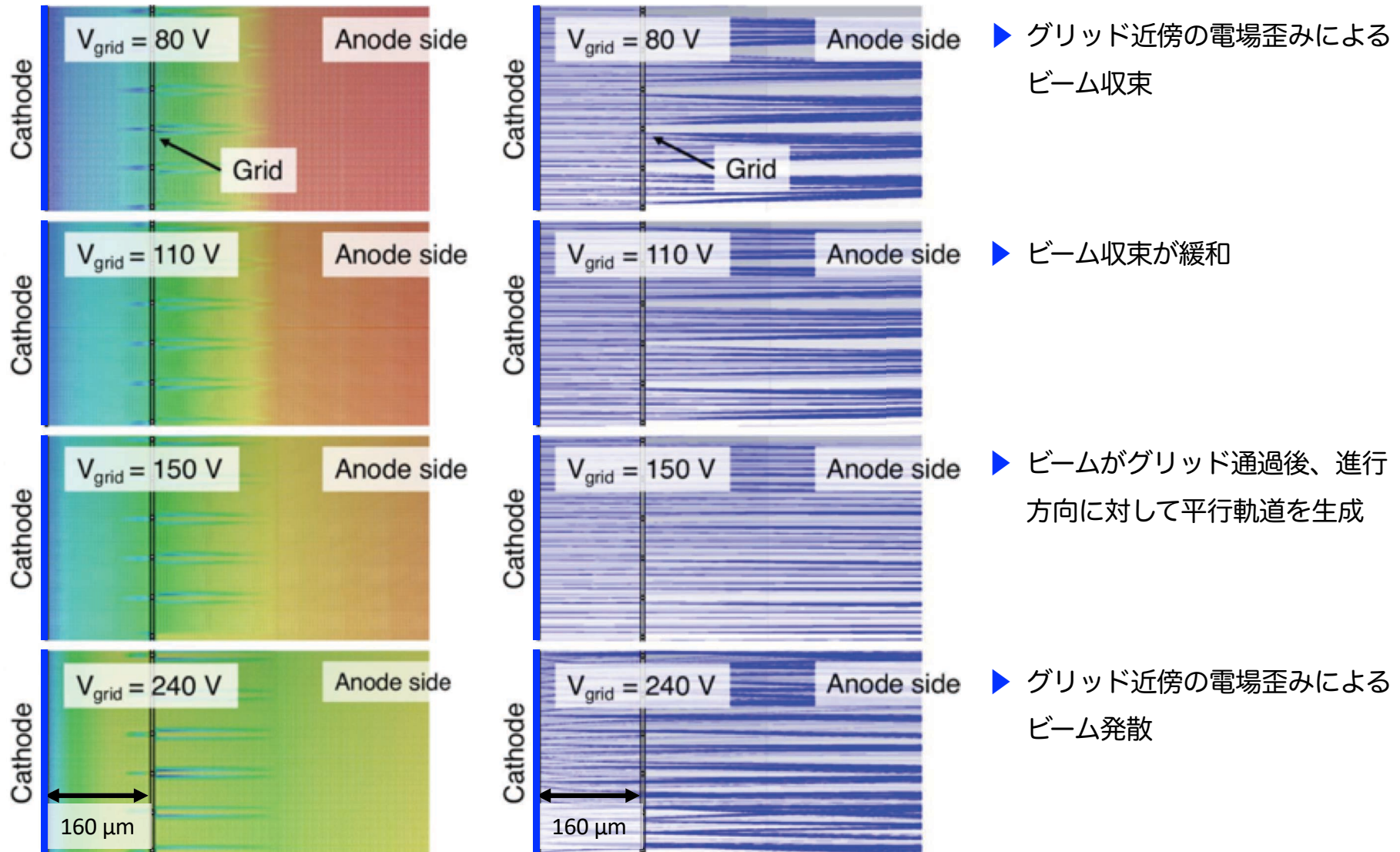


# グリッド近傍のレンズ効果によるビーム軌道への影響

グリッド近傍における横方向キック（収束・発散）はグリッド電圧に依存

ビーム収束、発散が生じない条件が存在

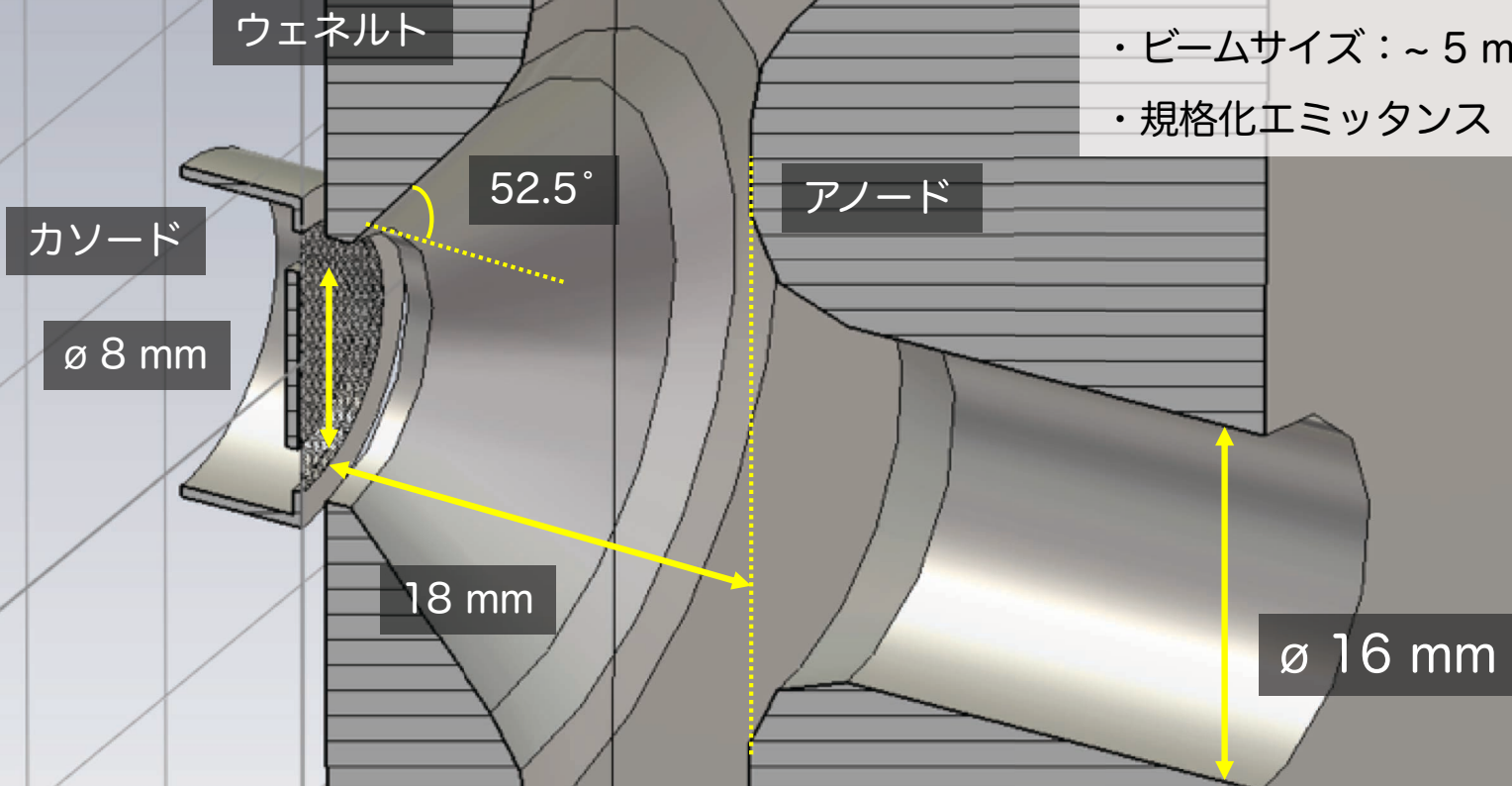
→ 「グリッドの透明化」 → エミッタンス 最小条件（横方向において一様分布ビームの生成）



# 50 kV電子銃の電極形状断面・配置・形状

## 目標ビームパラメータ

- ・ビーム電荷量：1 nC (1.7 A / 0.6 ns)
- ・ビームサイズ：~ 5 mm
- ・規格化エミッタンス：< 2 mm mrad



## CSTによる粒子トラッキング計算

- ・ Y-845グリッドメッシュなど、幾何学的構造を反映
- ・ 電極形状・配置最適化

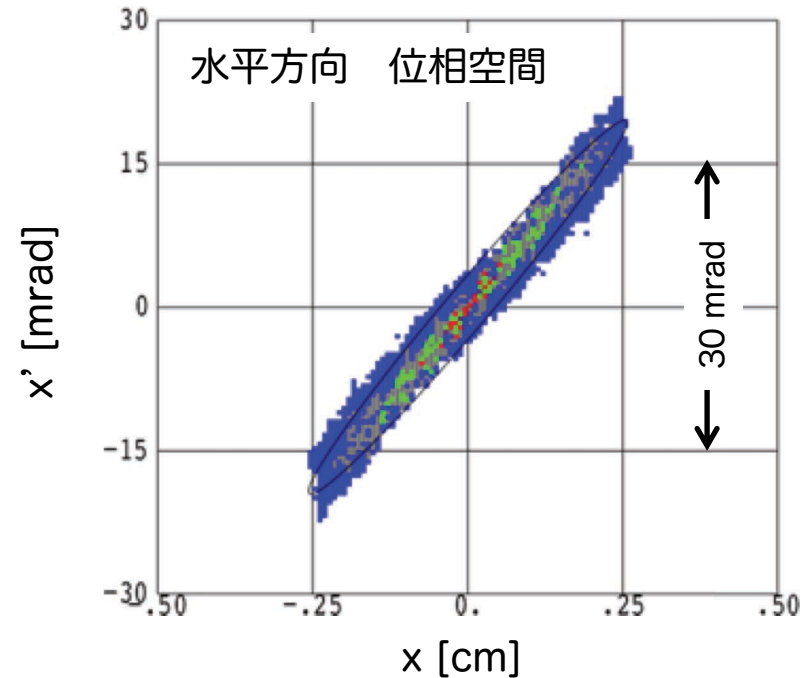
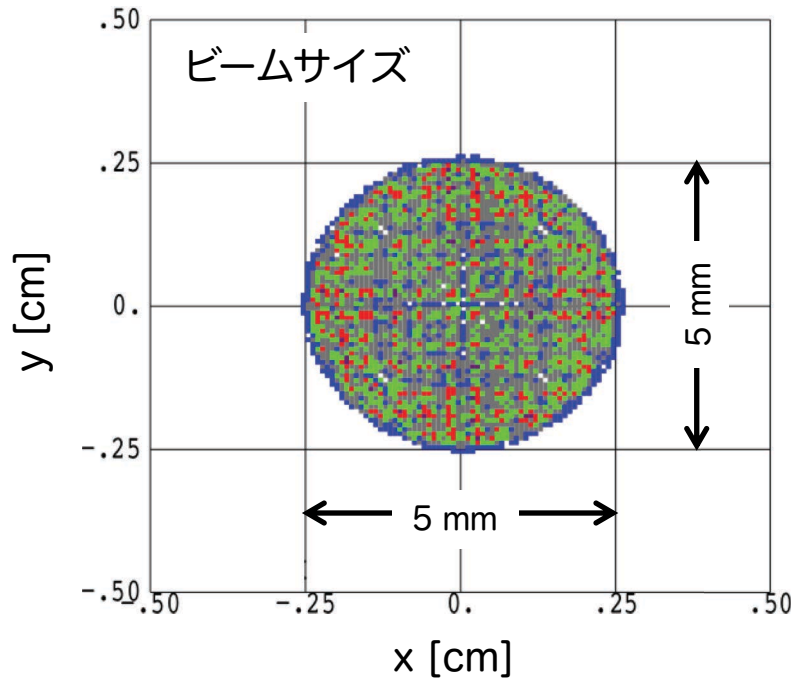
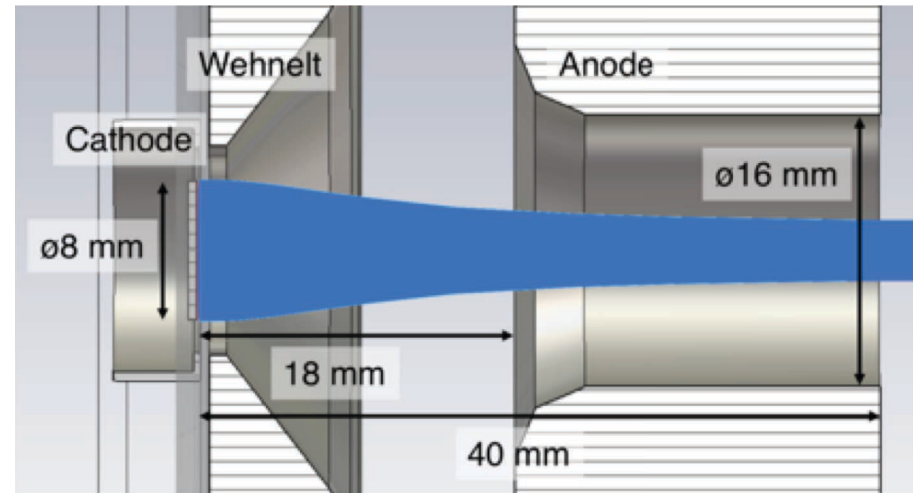
※ アノード・カソード間の電圧を50 kVまで下げることによって、「グリッドの透明化」が実現する  
グリッド・カソード間電圧も引き下げられる。→ 高速パルサーの低電圧化

# 50 kV電子銃 シミュレーション結果

アノード出口（熱陰極から40 mm）で評価

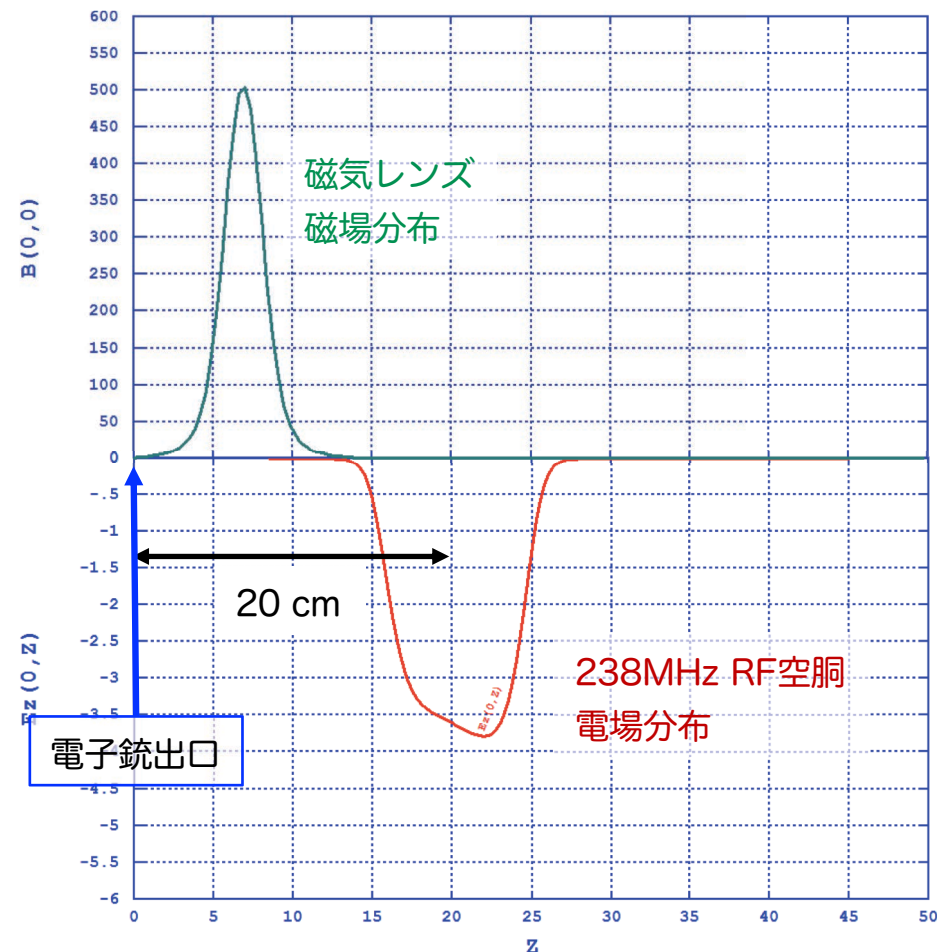
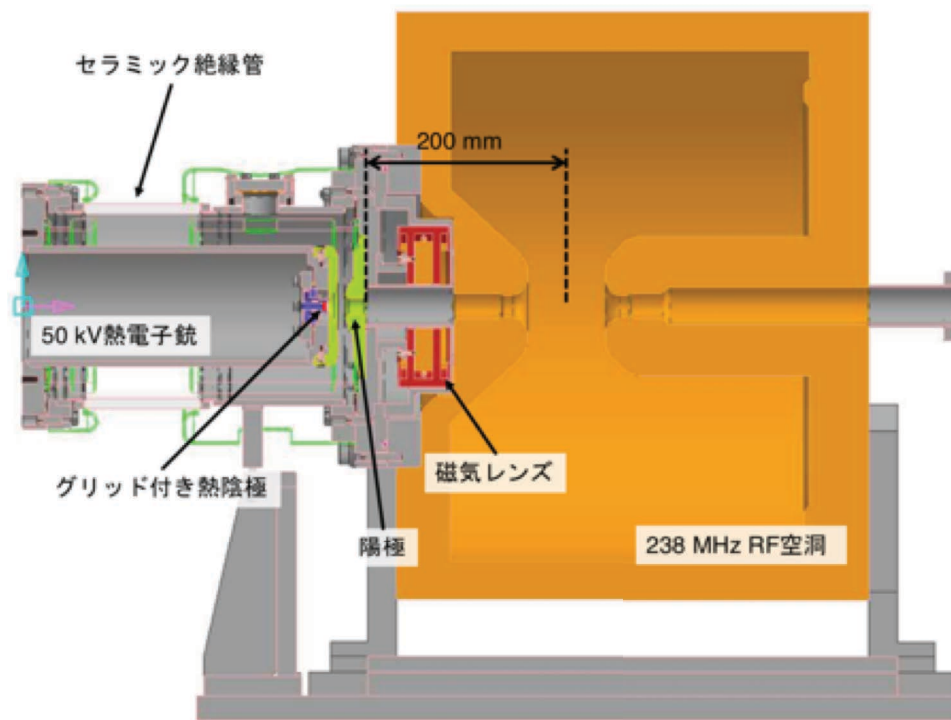
パラメータ	
エネルギー	50 keV
電荷量	1 nC (1.7 A / 600ps)
ビームサイズ	$\phi 5$ mm
エミッタンス	<u>1.3 mm mrad</u>

電極断面とビーム軌道



※ ビームの横方向分布において、一様性を維持

# 電子銃出口からRF空洞へのビーム輸送・RF空洞での加速

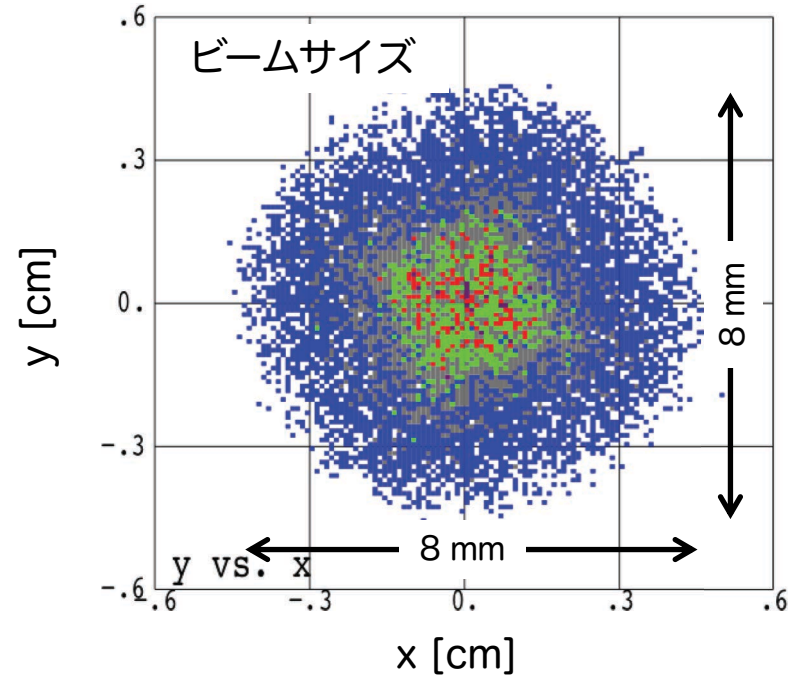


- ▶ 横方向分布の一様性を保ちながらビーム輸送を行うため、磁気レンズを使用
- ▶ 電子銃アノード・RF空洞ギャップ間距離はできるだけ短縮：20 cm
- ▶ 磁気レンズ磁場が、電子銃電極部、RF空洞電場に干渉しない配置 → 機能の独立性を確保
- ▶ 238 MHz RF空洞ギャップに到達したビームは、クレスト位相で500 keVまで加速

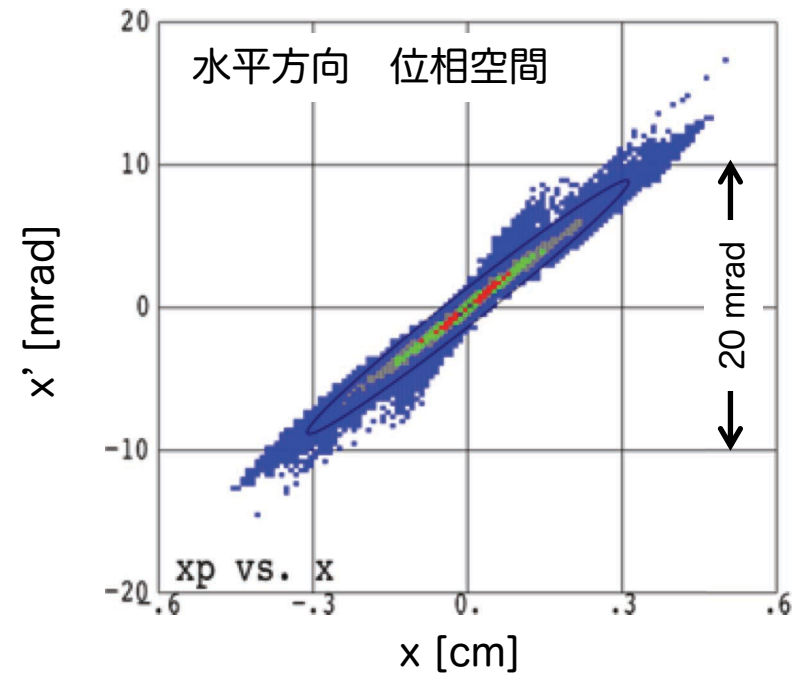
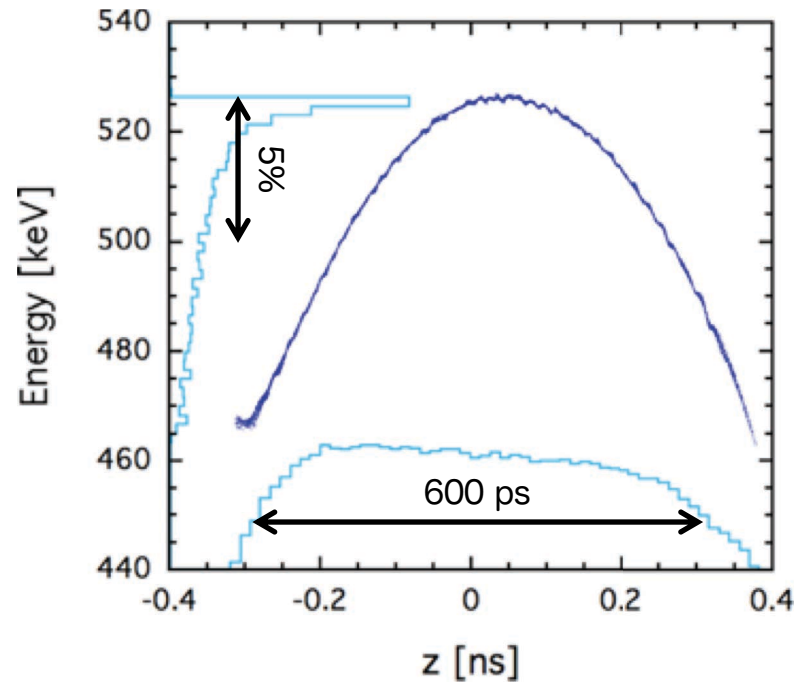


# 238 MHz RF空洞出口のシミュレーション結果

パラメータ	
エネルギー	500 keV
エネルギー幅	10% < 5% (60% core part)
ビーム輸送効率	100% (1 nC)
ビームサイズ	$\phi 8$ mm
エミッタンス	2.5 mm mrad (100%) 2 mm mrad (60%)



ビームパルス幅・エネルギープロファイル



# 低エミッタンスRF電子銃の製作

## 50 kV電子銃

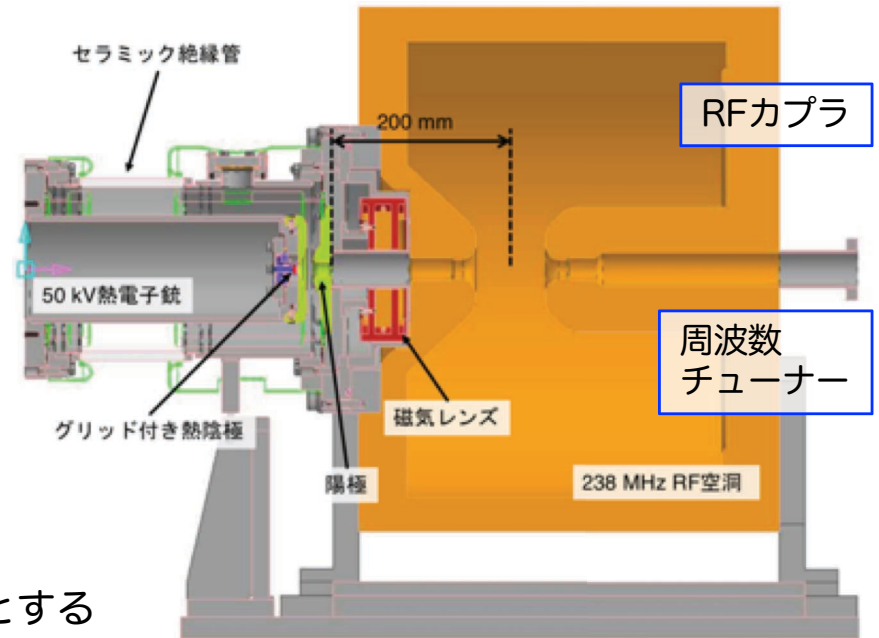
- ▶ 電極部の電場集中を緩和： $< 8 \text{ MV/m}$

## 磁気レンズ

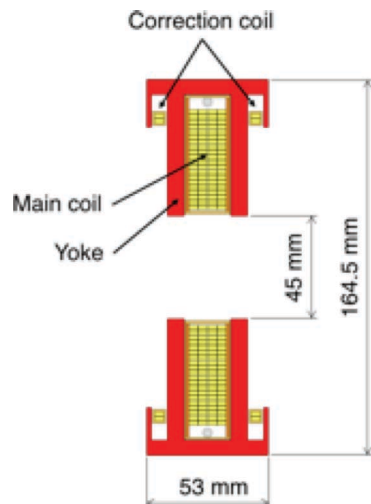
- ▶ 補正コイルを磁気レンズ両側に配置 → 狭小磁場の生成
- ▶ 真空フランジ付き金属ケースに収納 → 故障時、交換可能
- ▶ 0.1 mm以下の組立精度

## 238 MHz RF空洞

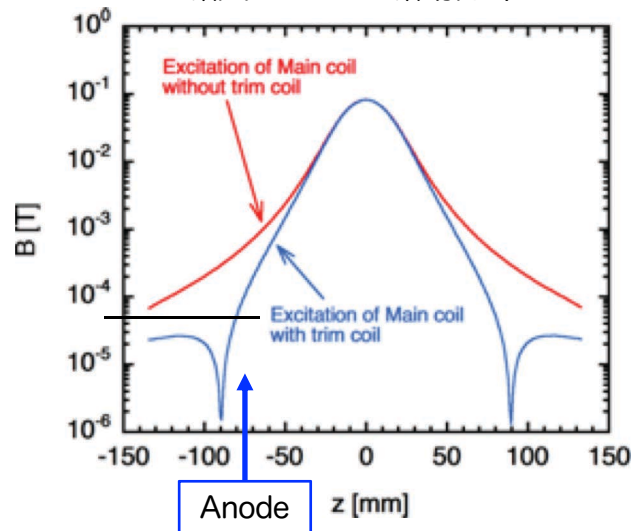
- ▶ リエントラント構造（電子銃側へギャップを移動）
- ▶ 高シャントインピーダンスを得るため、ビーム口径を $\phi 22$ とする
- ▶ 励振用RFカプラ、周波数チューナーは、ギャップ部分の電磁場対称性に影響しない配置



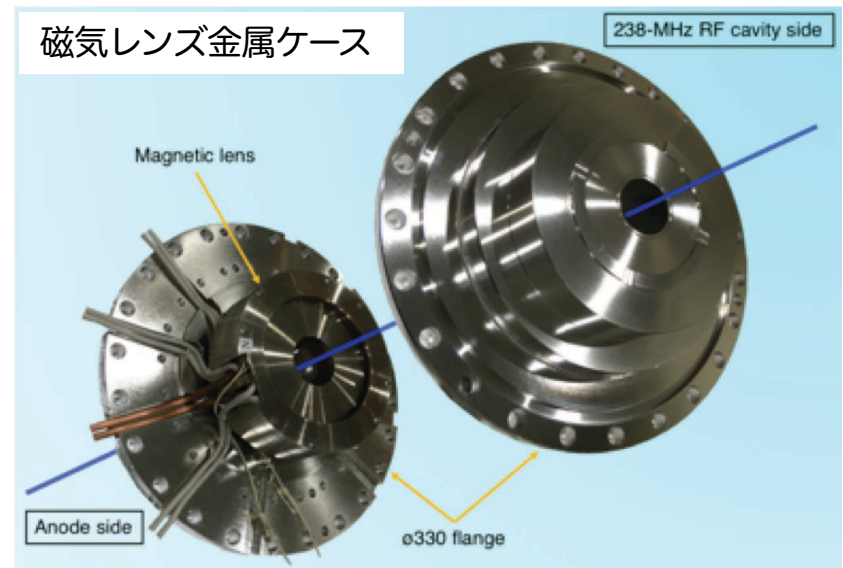
## 磁気レンズ断面形状



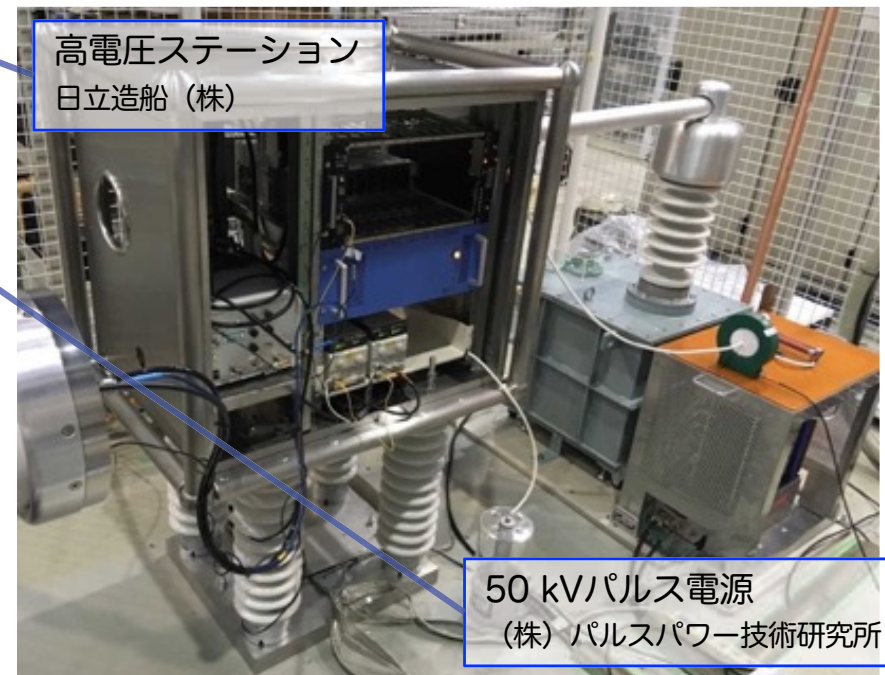
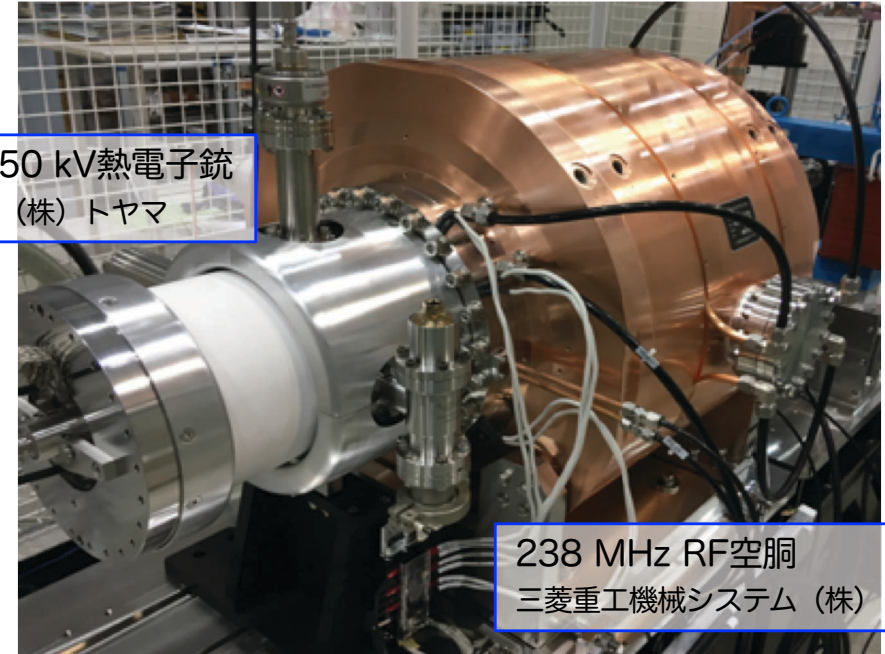
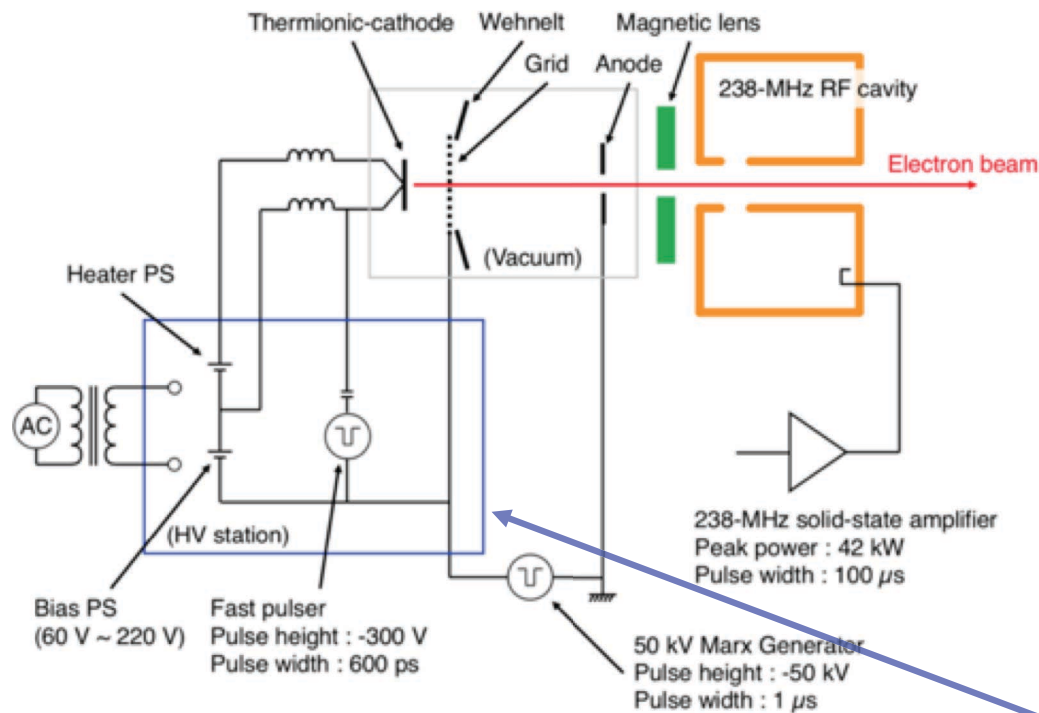
## 磁気レンズの磁場分布



## 磁気レンズ金属ケース



# 低エミッタンスRF電子銃 周辺機器

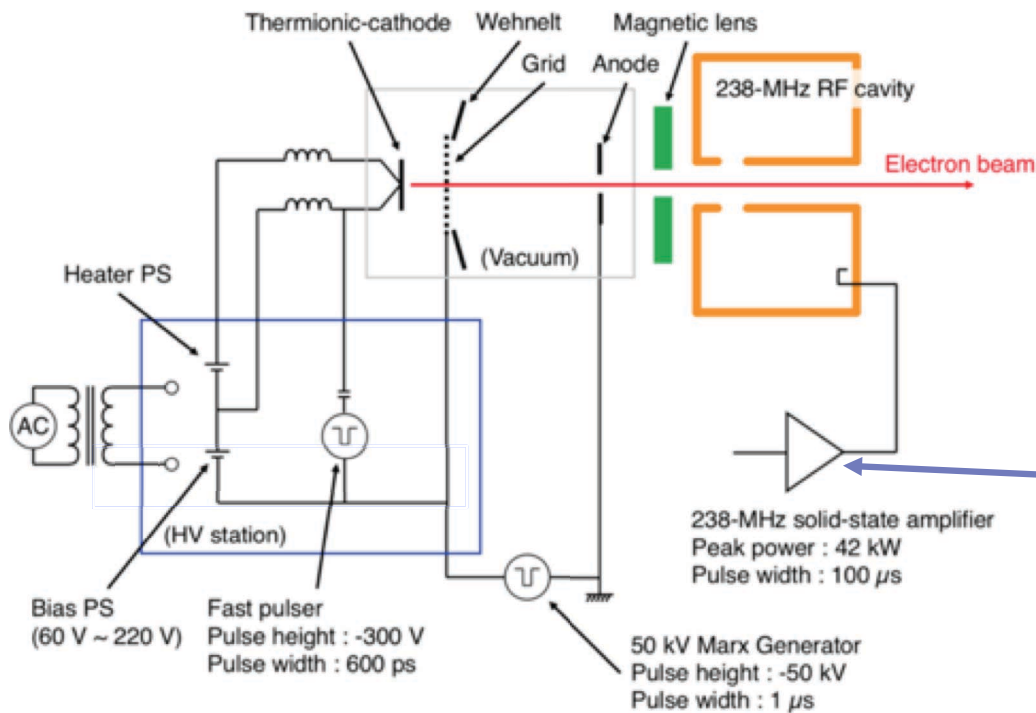


## 50 kVパルス電源

- ▶ 耐電圧13 kVの半導体スイッチを用いたMarx回路
- ▶ 6段のMarx回路の構成 → 小型化
- ▶ 電圧安定度 : < 0.05% (< 500 ppm)  
→ 充電電源の安定度から< 100 ppm (予測値)

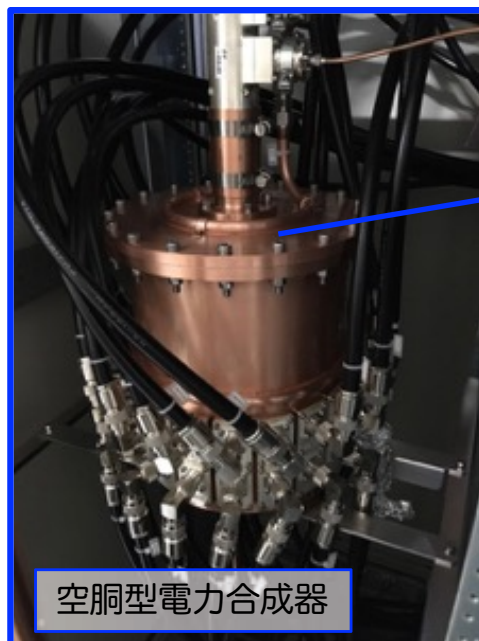
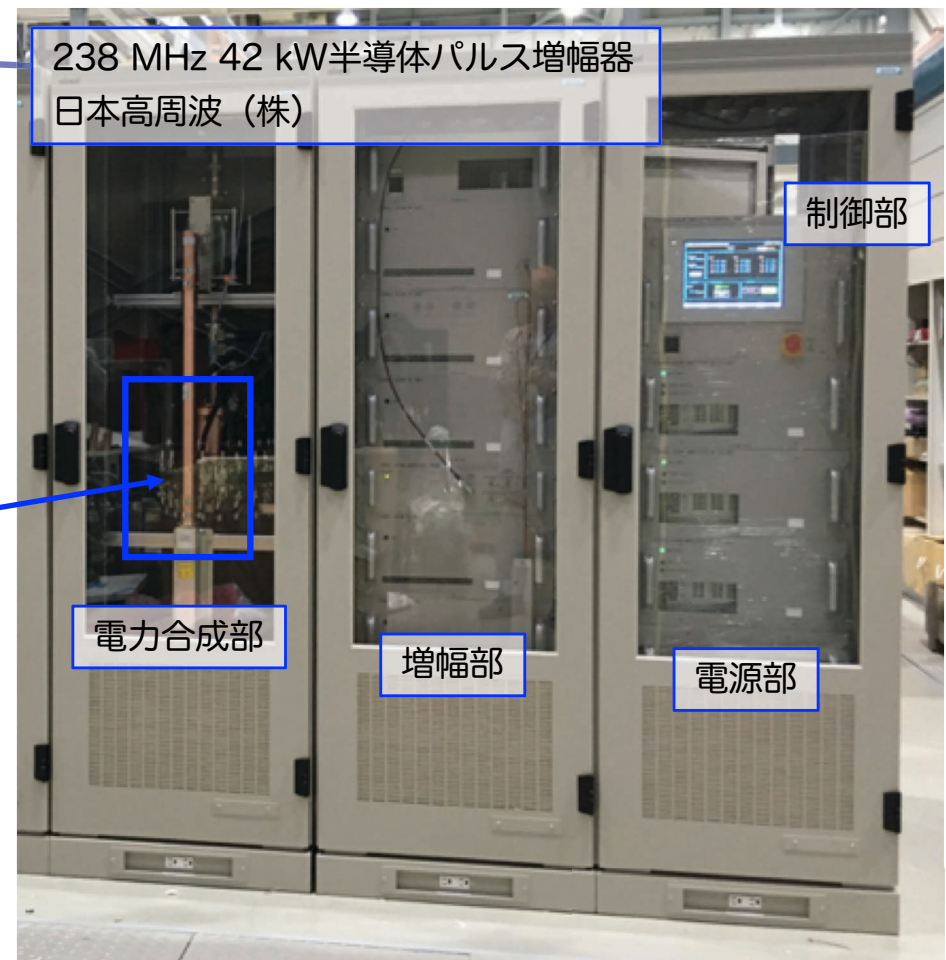


# 低エミッタンスRF電子銃 周辺機器

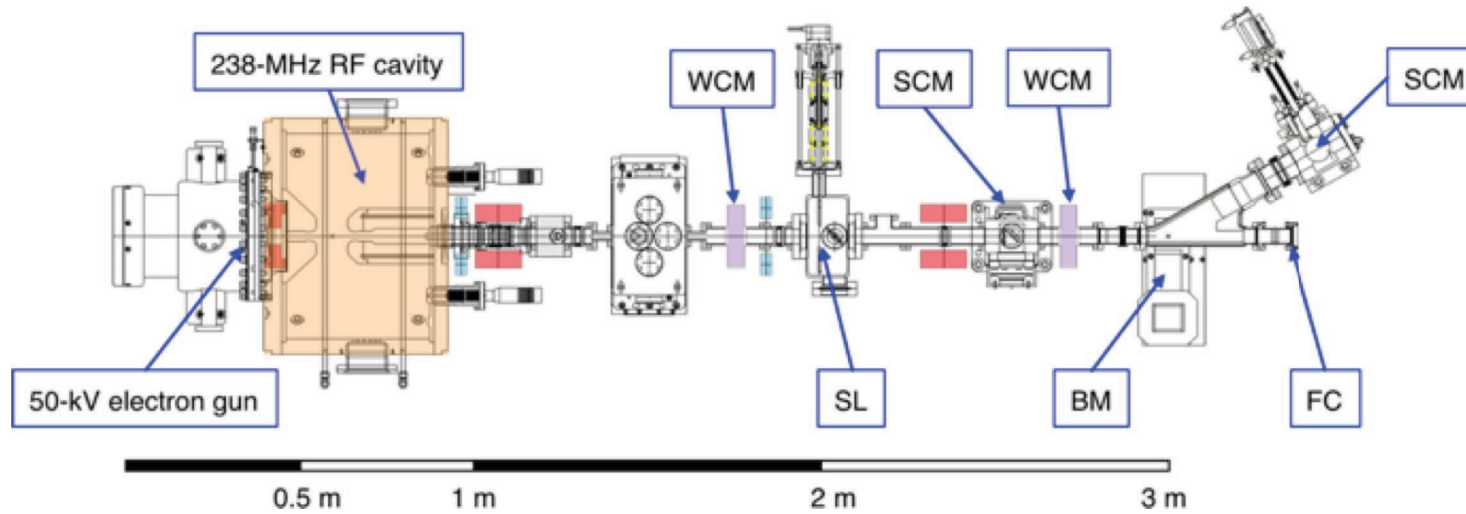


## 238 MHz 42kW半導体パルス増幅器

- ▶ 制御部、電源部、増幅部、RF電力合成部で構成
- ▶ 全てのユニットが19インチラック3台に収納
- ▶ RF電力安定度：0.01% (rms)
- ▶ 位相安定度：0.02° (rms)

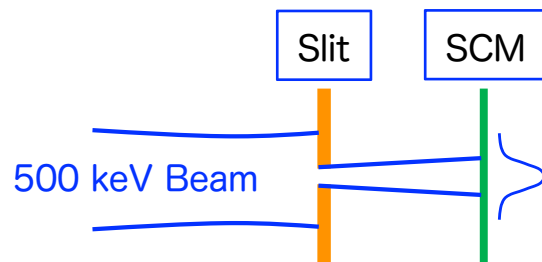


# 低エミッタンスRF電子銃テストスタンド 機器配置、ビーム試験項目

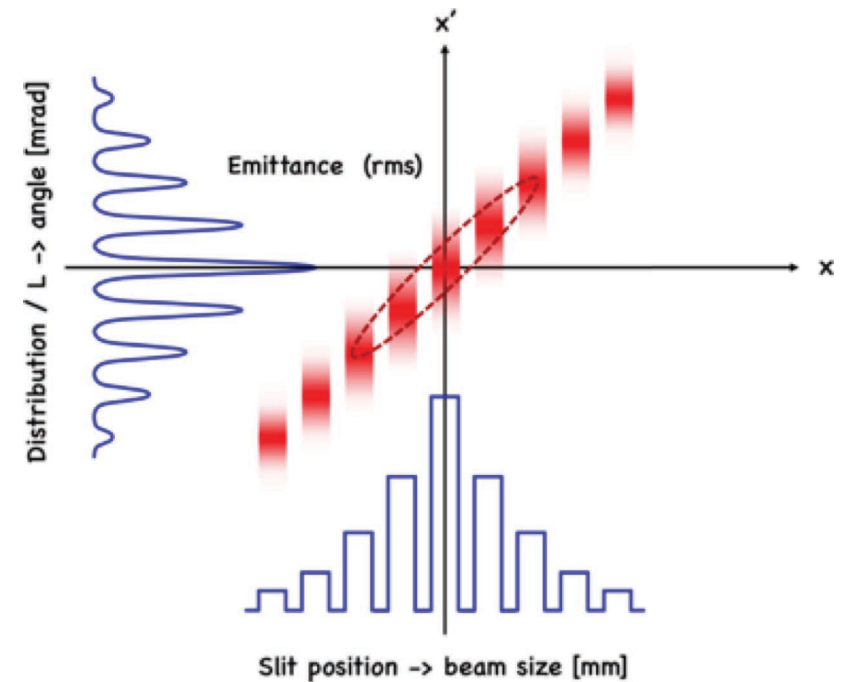


- ▶ エネルギー測定 (TOF測定、2台の壁電流モニタ)
- ▶ エネルギー幅測定 (偏向電磁石+スクリーンモニタ)
- ▶ 電荷量測定 (壁電流モニタ、ファラデーカップ)
- ▶ ビームサイズ測定 (スクリーンモニタ)

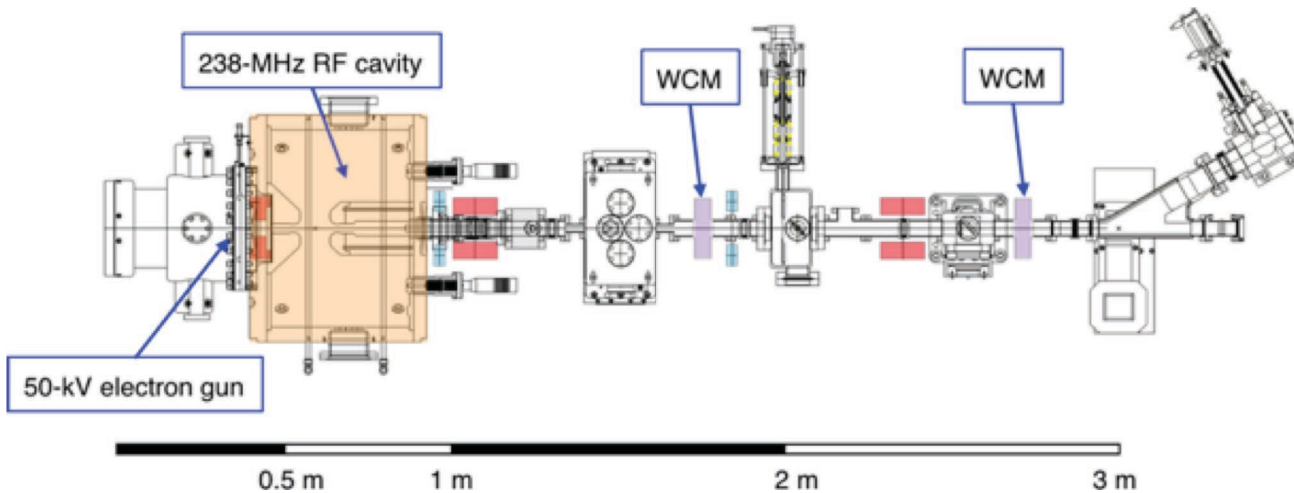
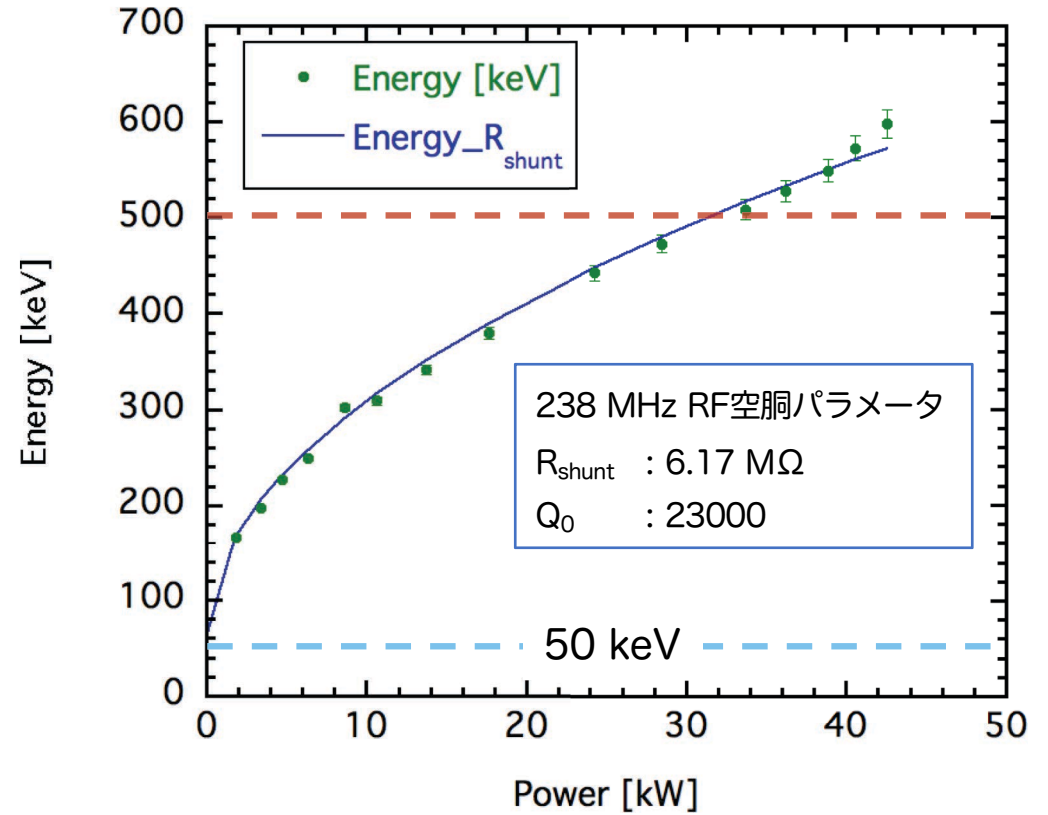
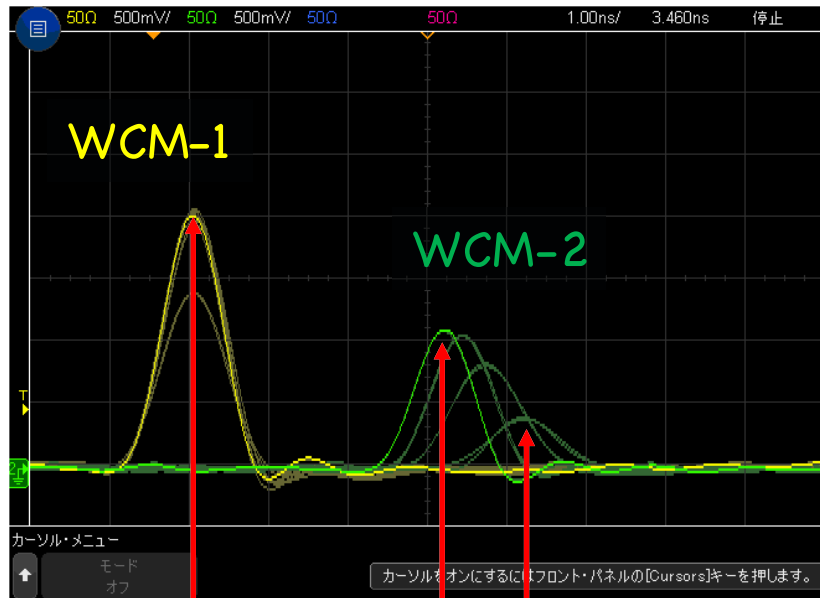
- ▶ エミッタンス測定 (スリットスキャン)



スリット幅 : 100  $\mu\text{m}$   
移動ステップ : 250  $\mu\text{m}$



# エネルギー測定 (TOF測定)

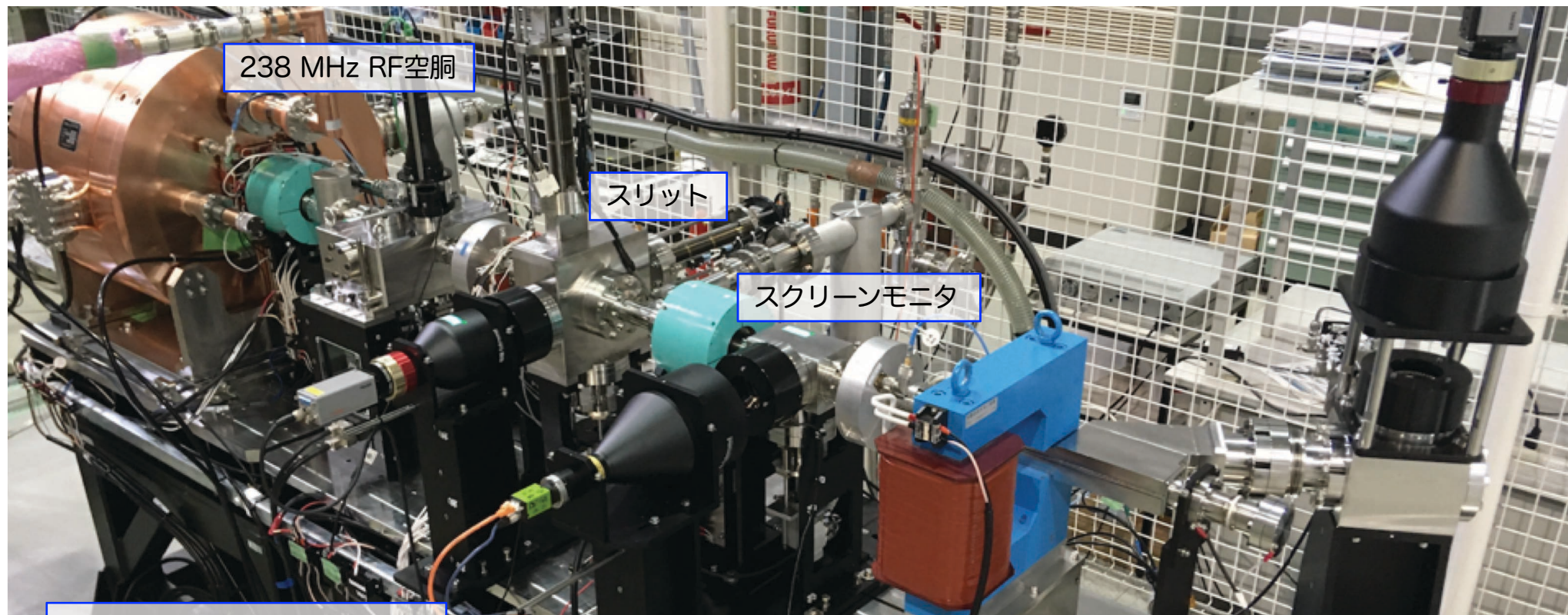


$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{l}{\Delta t} \frac{1}{c}$$

$$E = \frac{0.511}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 0.511$$

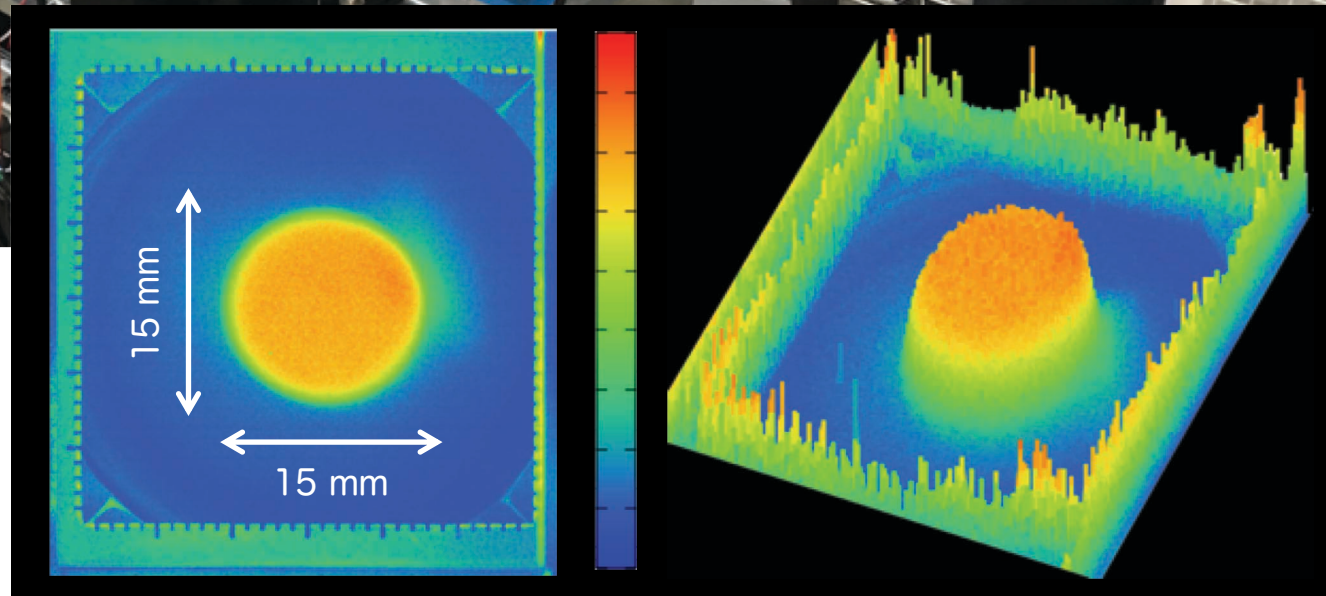


# ビームサイズ・強度分布測定

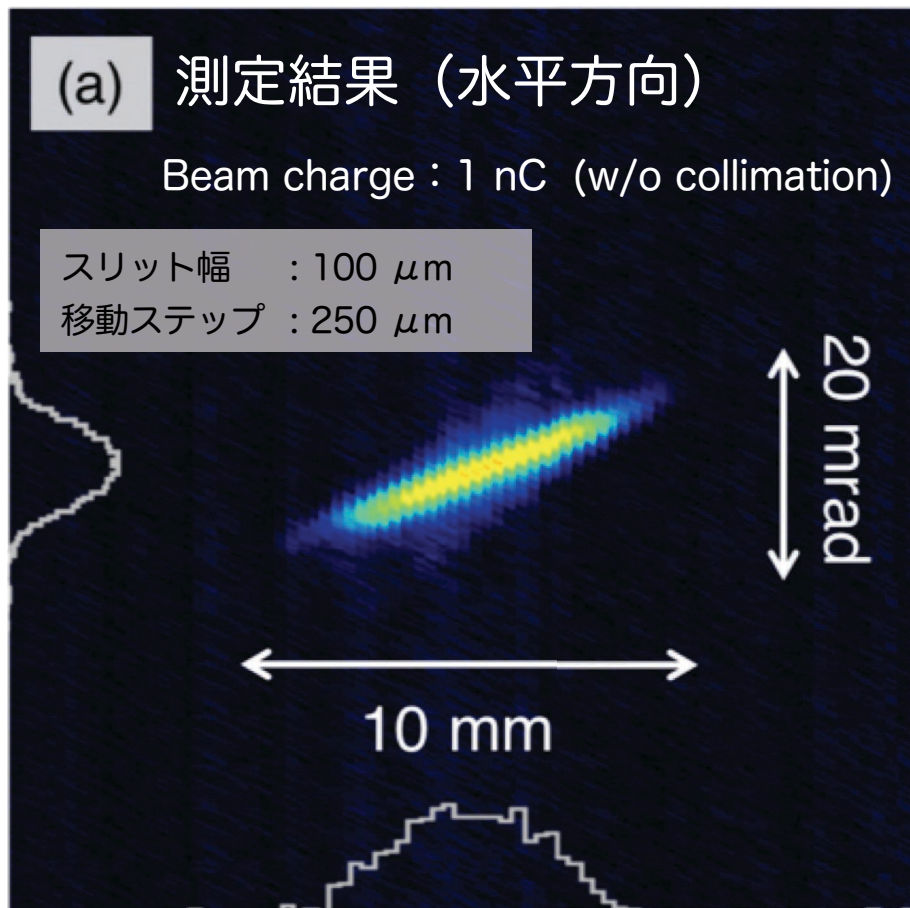


- ・CeYAG (0.1 mm)
- ・CCDカメラ (GigE)
- ・テレセントリックレンズ

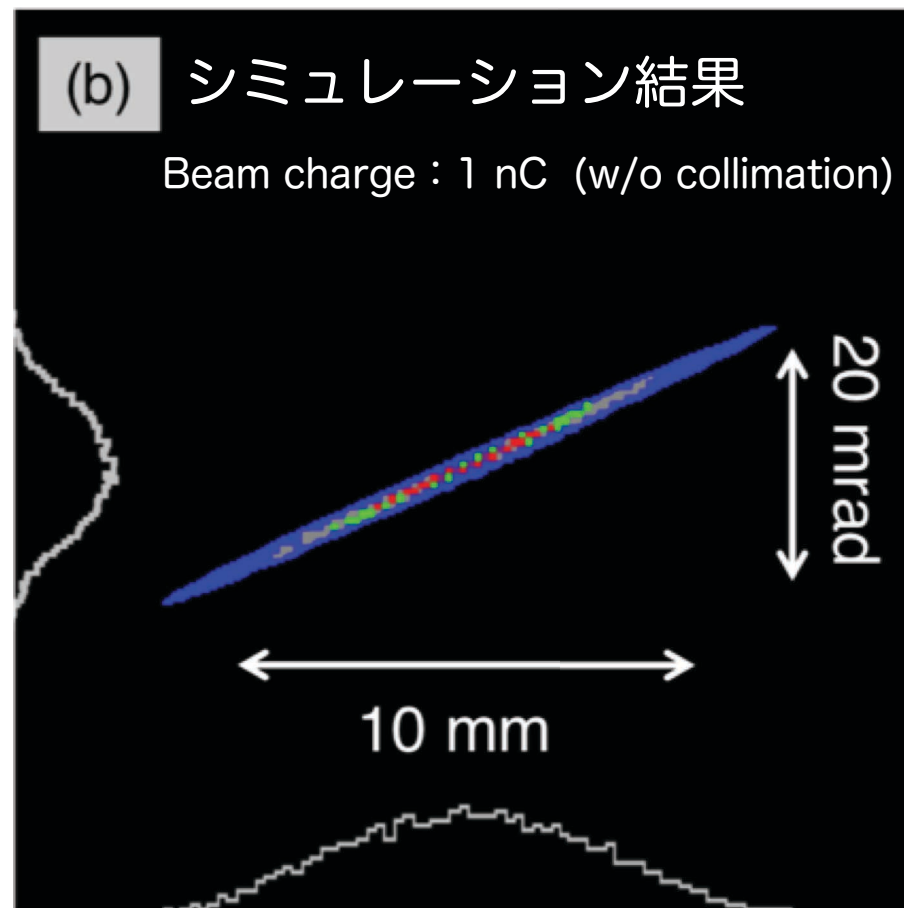
500 keVビームの強度分布が、  
一様性をもつことを確認







- Normalized  $\epsilon_x$  : 3.1 mm mrad (Gaussian fitting)  
 : 1.7 mm mrad (rms, 60%)

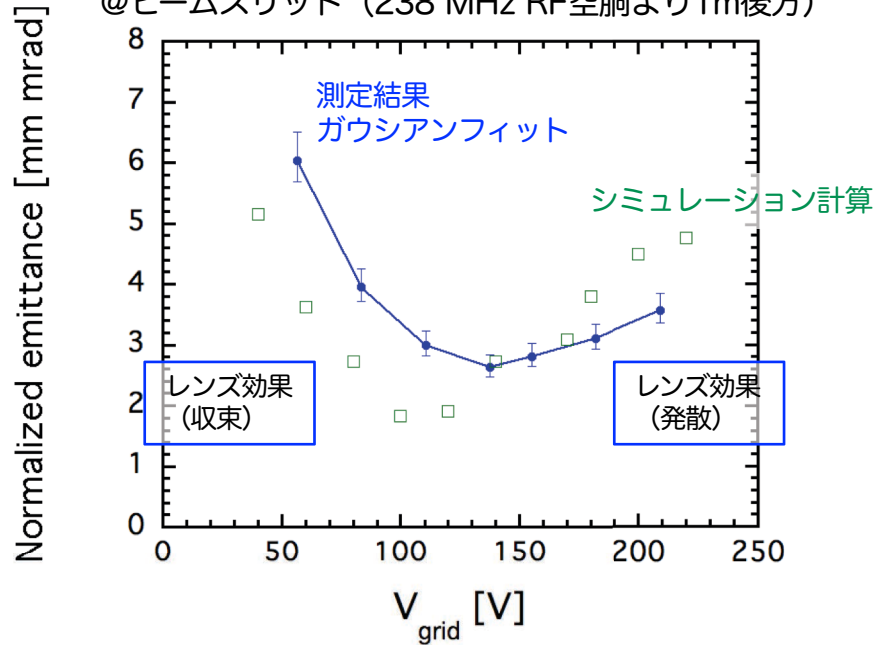


- Normalized  $\epsilon_x$  : 2.0 mm mrad (rms, 60%)

$$\epsilon_{n, rms} = \overline{\beta\gamma} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x \cdot x' \rangle^2}$$

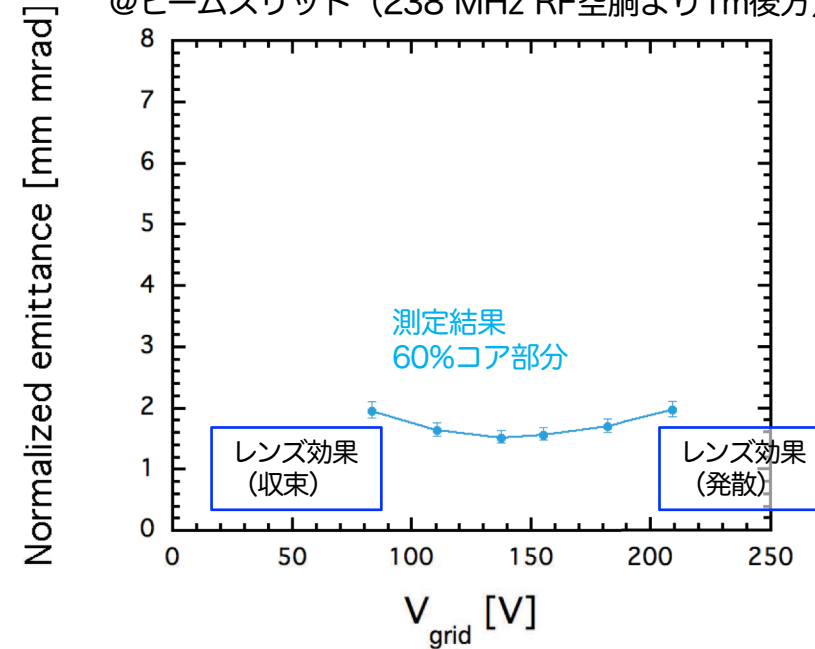
▶ エミッタンス依存性 (500 keVビーム)

@ビームスリット (238 MHz RF空洞より1m後方)



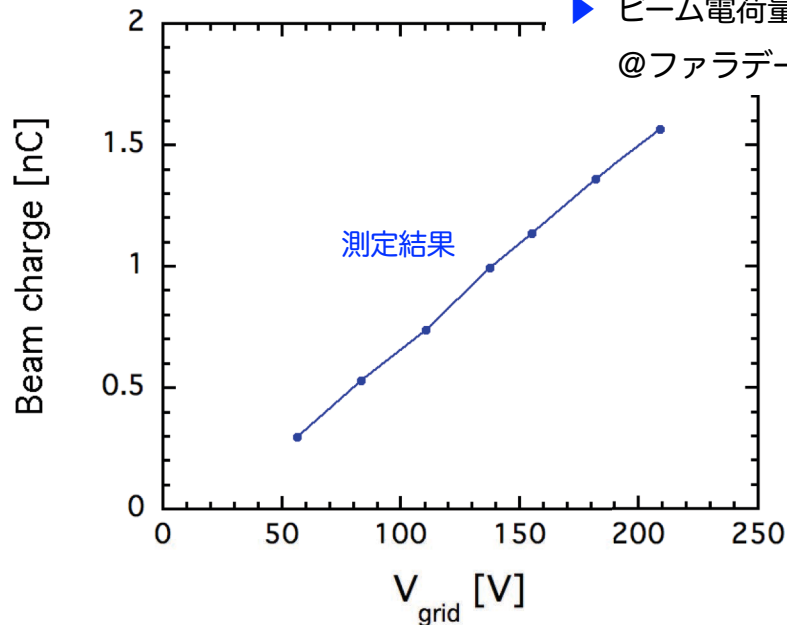
▶ エミッタンス依存性 (500 keVビーム)

@ビームスリット (238 MHz RF空洞より1m後方)



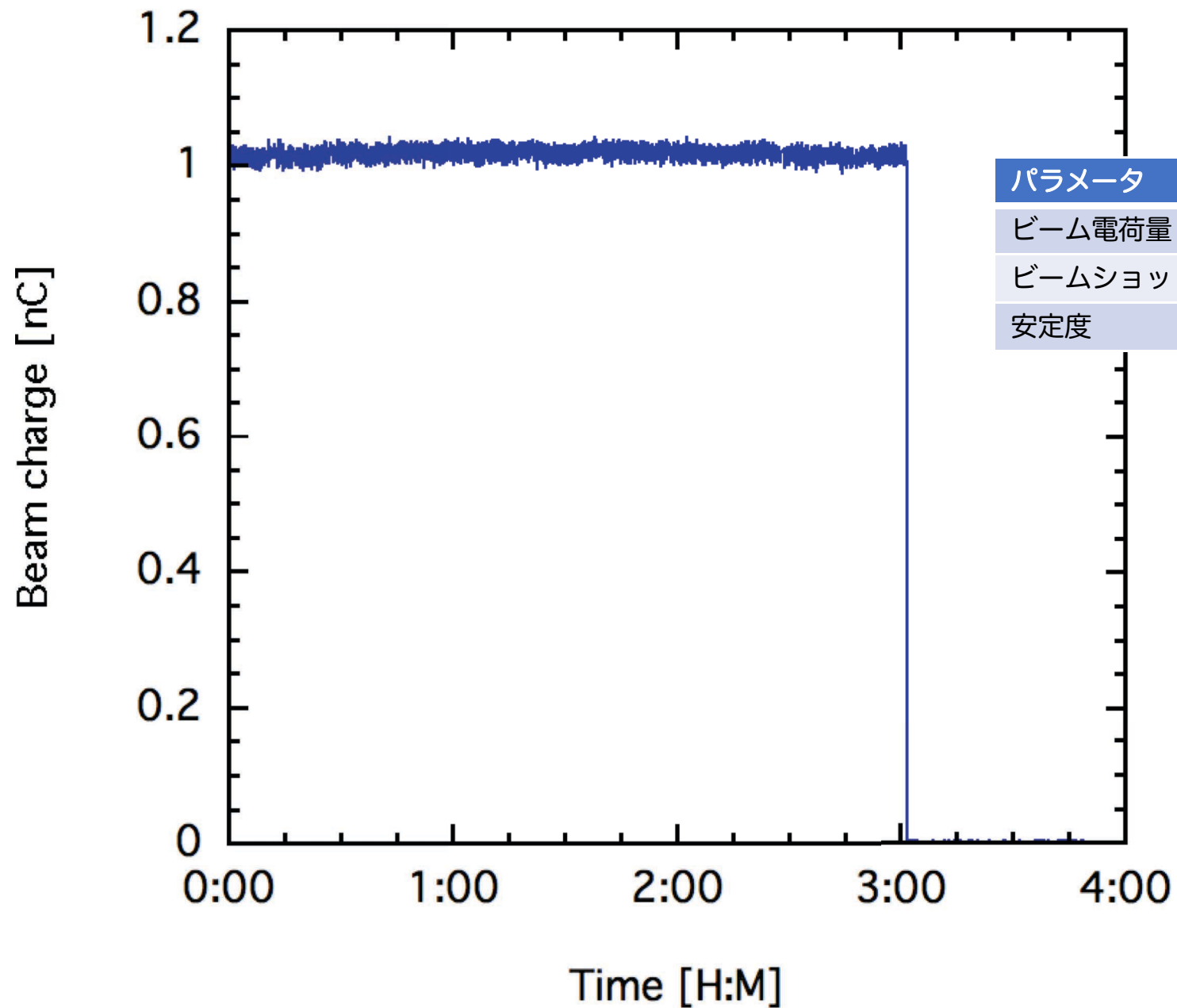
▶ ビーム電荷量依存性 (500 keVビーム)

@ファラデーカップ



- グリッド電圧 (40 – 220 V) によるエミッタンス、ビーム電荷量の測定
- グリッド近傍のレンズ効果 (収束・発散) のため、エミッタンス増大を観測
- エミッタンス最小となるグリッド電圧が存在

# ビーム電荷量安定度



## パラメータ


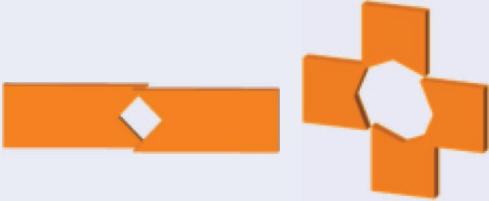
ビーム電荷量	1 nC
ビームショット数	3652 count
安定度	0.9% (SD)

CT+積分回路を使用

# ビーム実証試験 測定結果

	RF gun (1.6-cell BNL type) with photocathode and short pulse laser.	Thermionic cathode gun without grid mesh, followed by buncher.	RF gun with gridded thermionic cathode, followed by buncher.
Cathode type	Photocathode (Cu)	Thermal cathode CeB <sub>6</sub> single crystal (ø3mm)	Thermal cathode Y845 (ø8mm)
Charge	1 nC	1 nC	1 nC
Pulse width	10 ps	1 ns (Chopper, Collimator)	600 ps
Energy	4 MeV	500 keV	500 keV
Emittance	1.5 mm mrad	1.1 mm mrad	1.7 mm mrad (60% core part)
Merits	Direct generation of bunched beam from the cathode using short pulsed laser system.	No dark current Stability Lifetime Reliability and robustness	No dark current Stability Lifetime Reliability and robustness Maintainability Cost reduction

# ビームコリメータ

Type	Iris	Feature	
Multistage (4 or 5)	Circle	<ul style="list-style-type: none"><li>- Using one motor.</li><li>- Beam charge varies discretely.</li><li>- Beam charge varies continuously using ML, however, beam orbit changes.</li></ul>	
Continuously variable	Square Polygon	<ul style="list-style-type: none"><li>- Using two or more motors.</li><li>- Non-uniform distribution.</li><li>- Complicated structure</li></ul>	

Development of beam collimator with following features

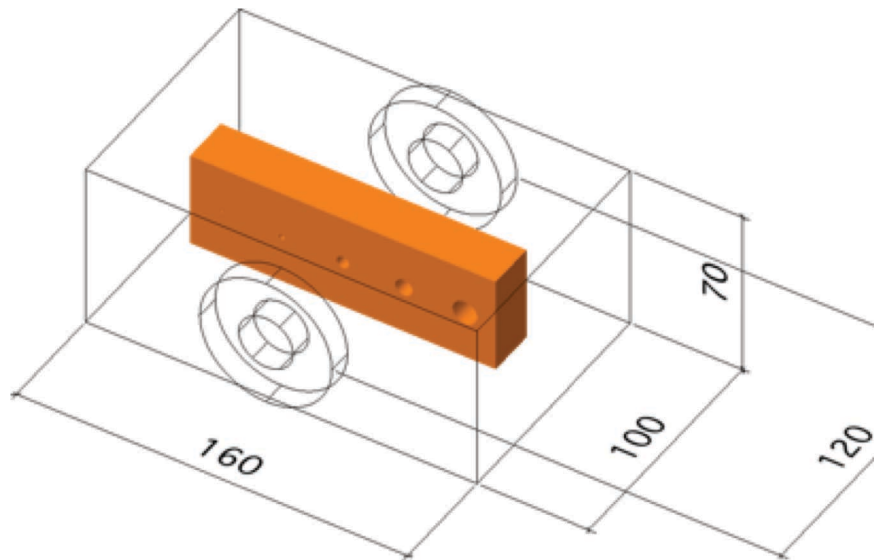
Material : Cu、 Effective thickness : 4 mm (Condition : 500 keV、 1 Hz、 1 nC)

- Iris shape is circle.
- Iris can be continuously changed.
- The structure should not be complicated. Operation with one motor.
- Excellent reproducibility and durability.
- Low cost.

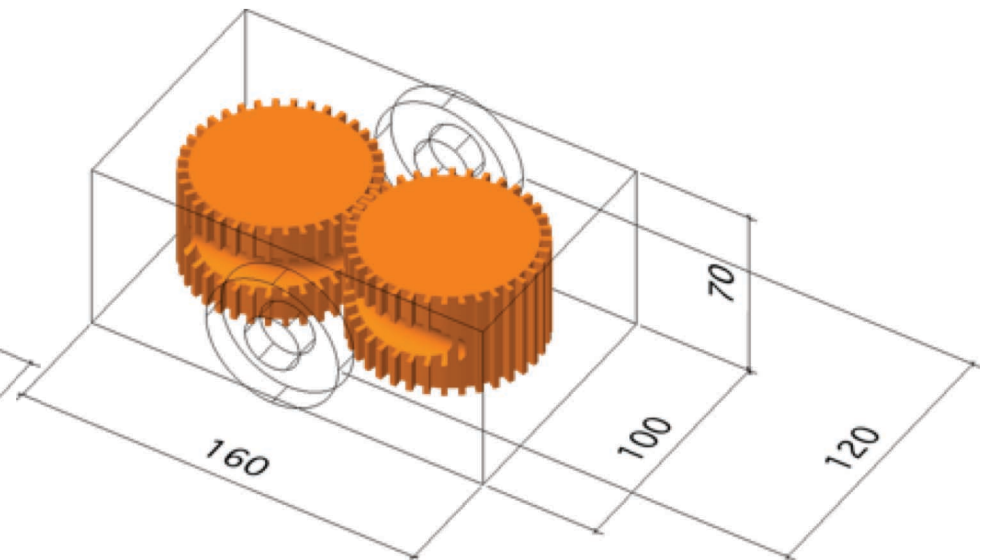
# コリメータ配置、および寸法

- ・ ビームパイプフランジ : ICF54
- ・ 材質 : Cu
- ・ 実効長 :  $> 4$  mm
- ・ フランジ面間距離 :  $< 140$  mm
- ・ ビームエネルギー :  $< 500$  keV
- ・ ビーム電荷量 :  $< 1$  nC
- ・ 冷却水 : なし

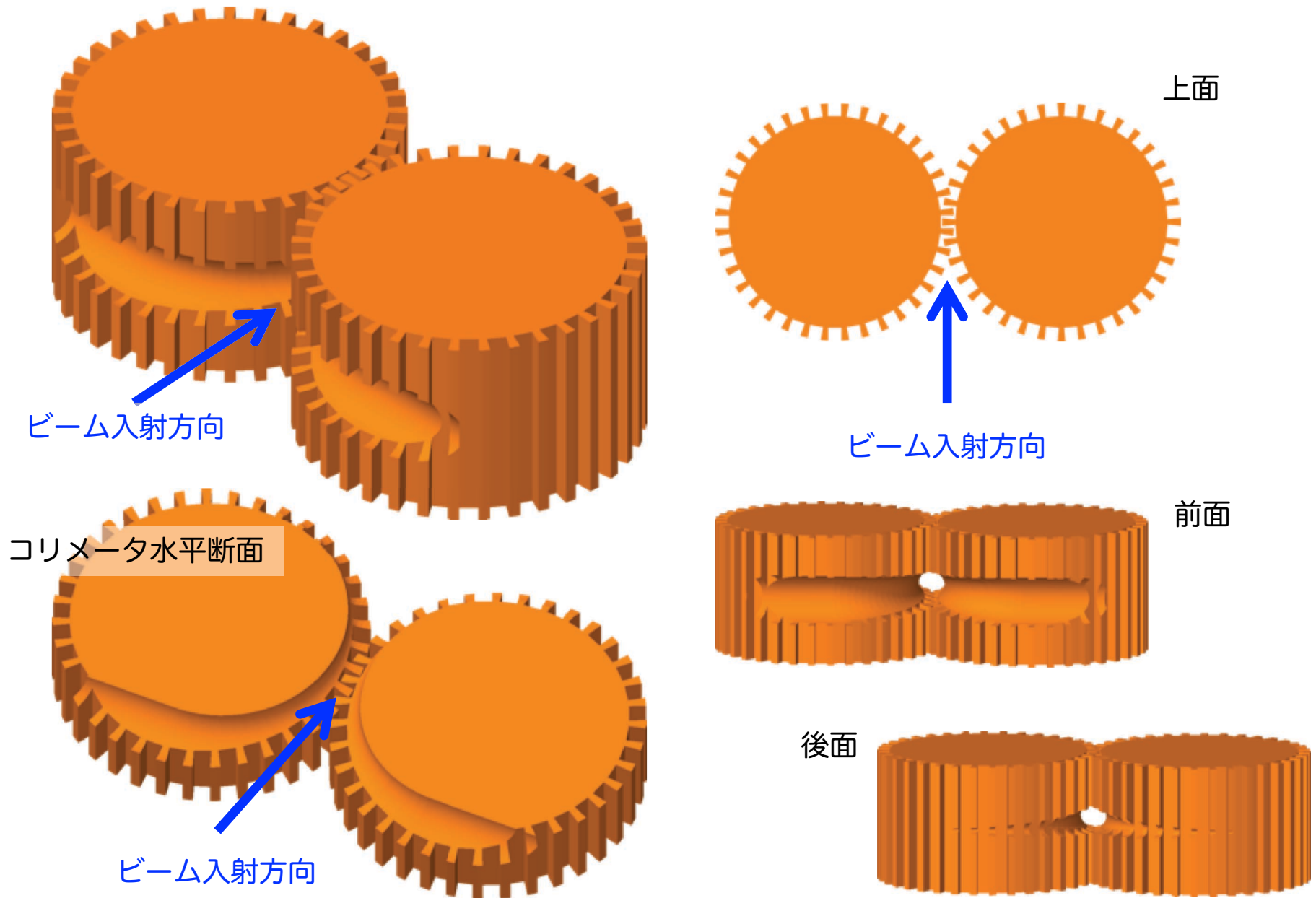
従来型コリメータ (離散的)



連続可変コリメータ

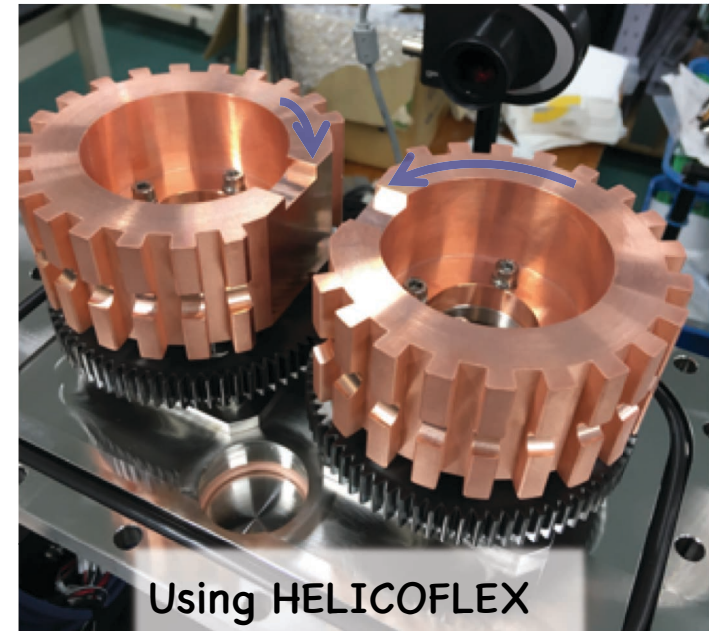
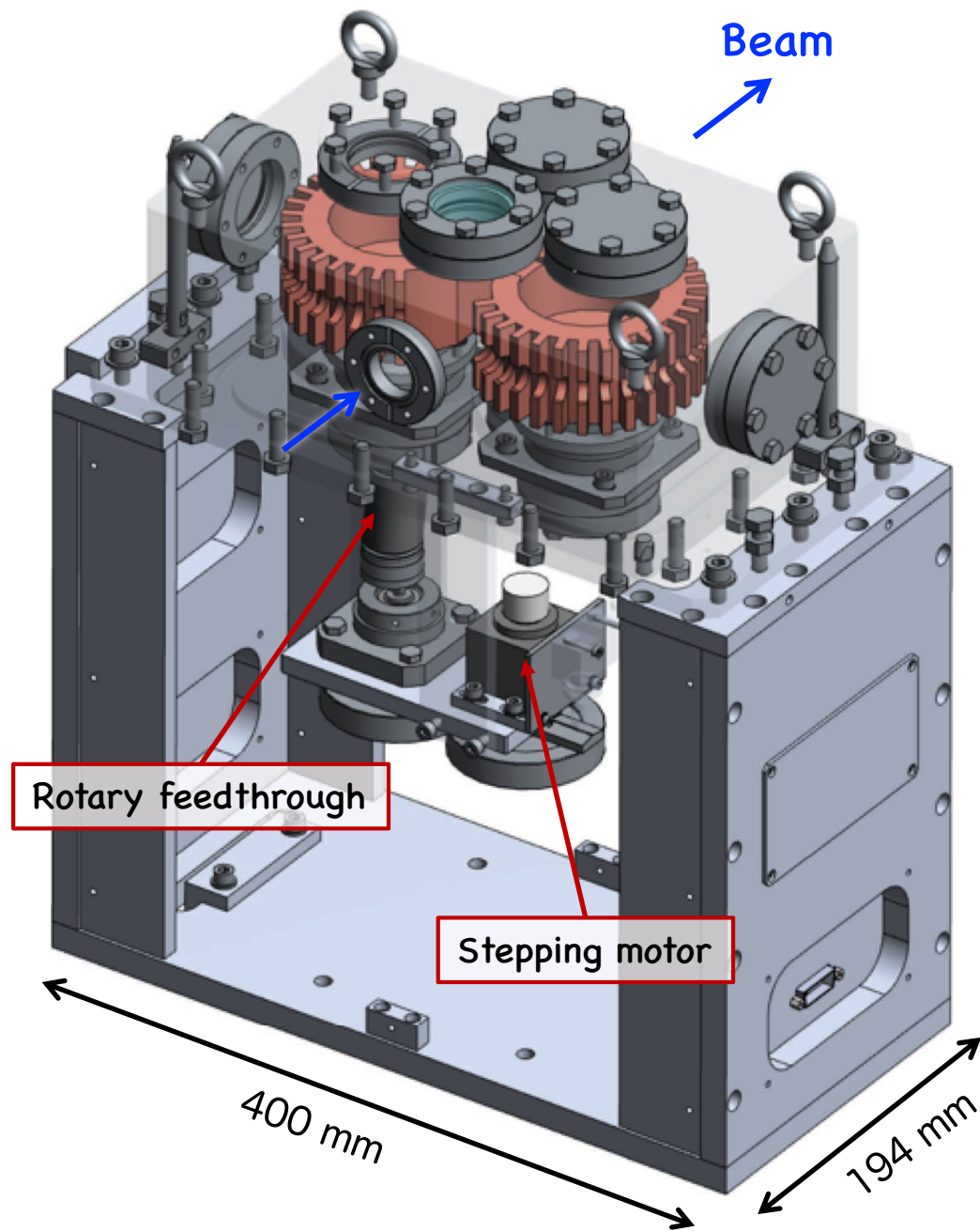


# ビーム孔サイズ連続可変コリメータ概念図



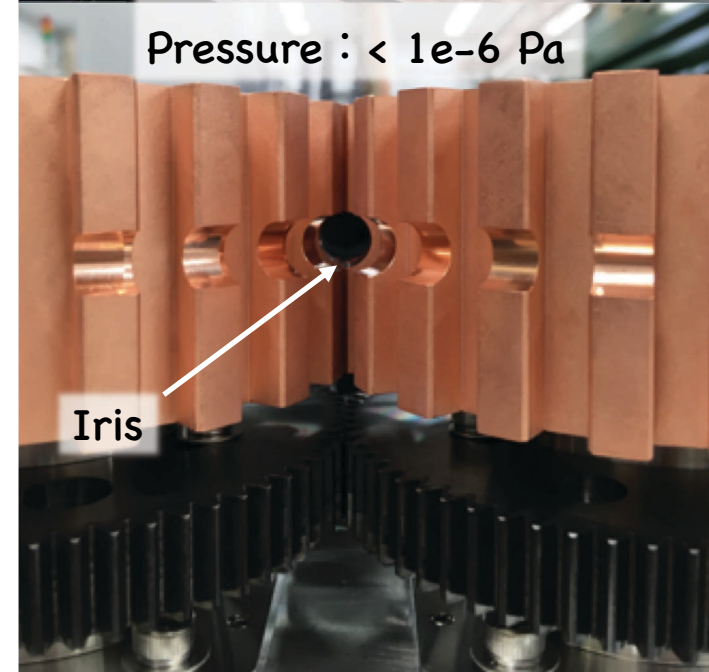


# 連続可変コリメータの製作



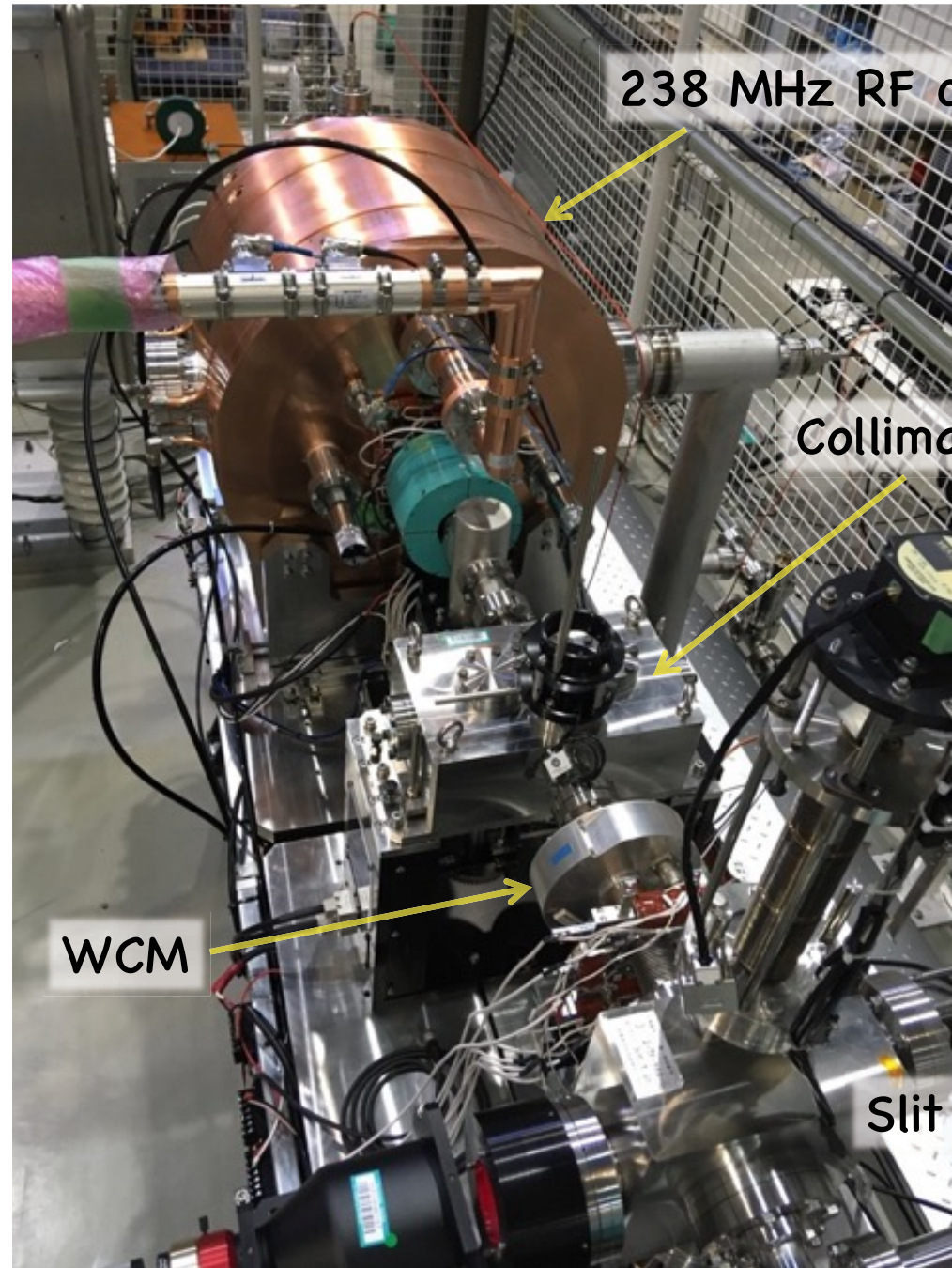
Using HELICOFLEX

Pressure :  $< 1e-6$  Pa



Iris

# 連続可変コリメータの設置、ビーム試験準備



238 MHz RF cavity

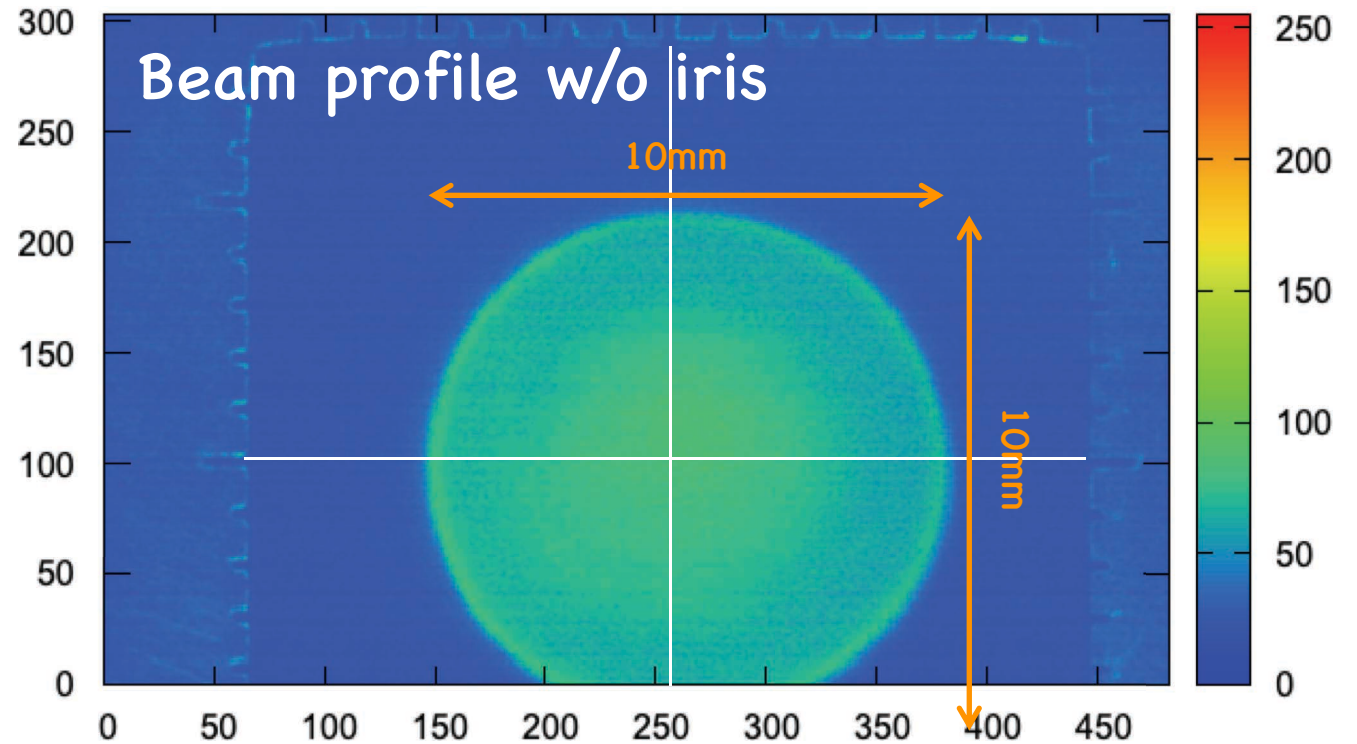
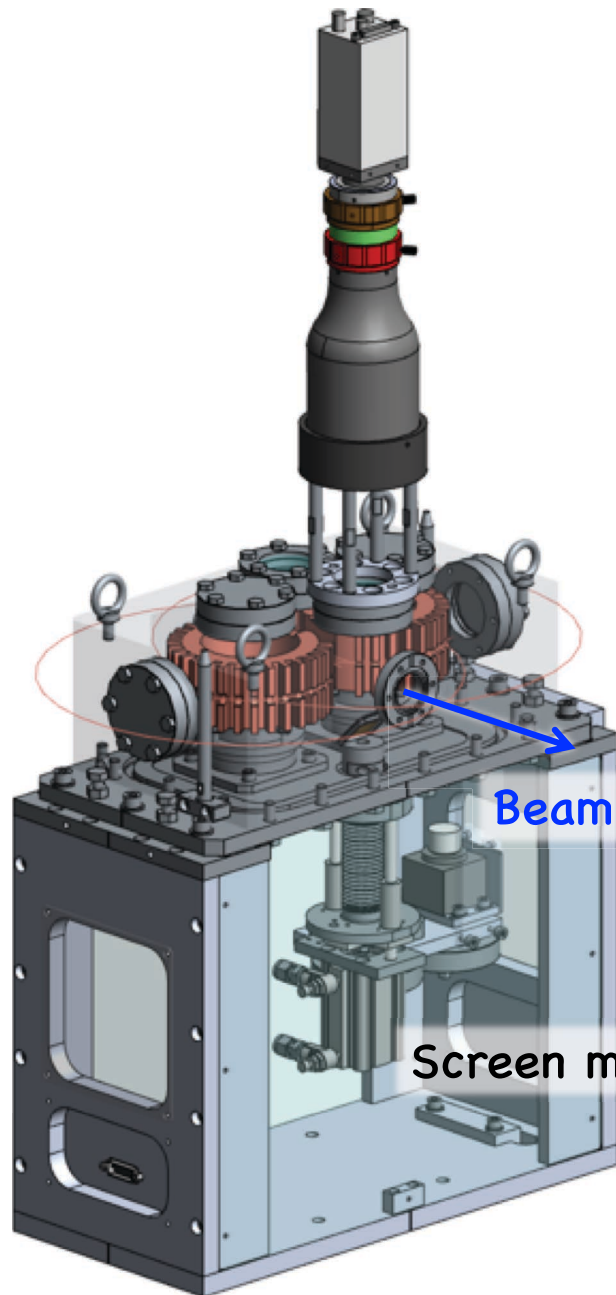
Collimator with screen

WCM

Slit



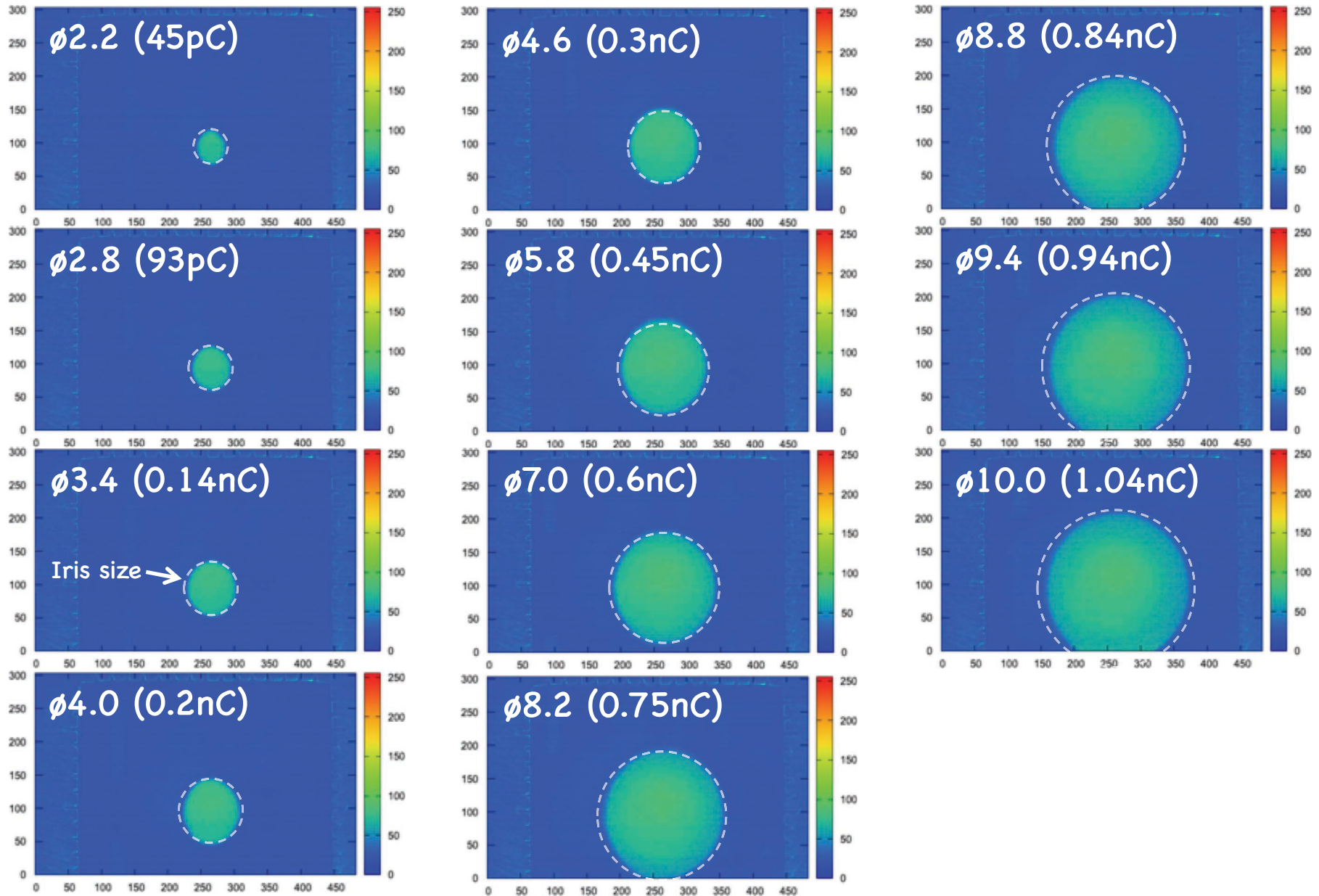
# ビーム試験



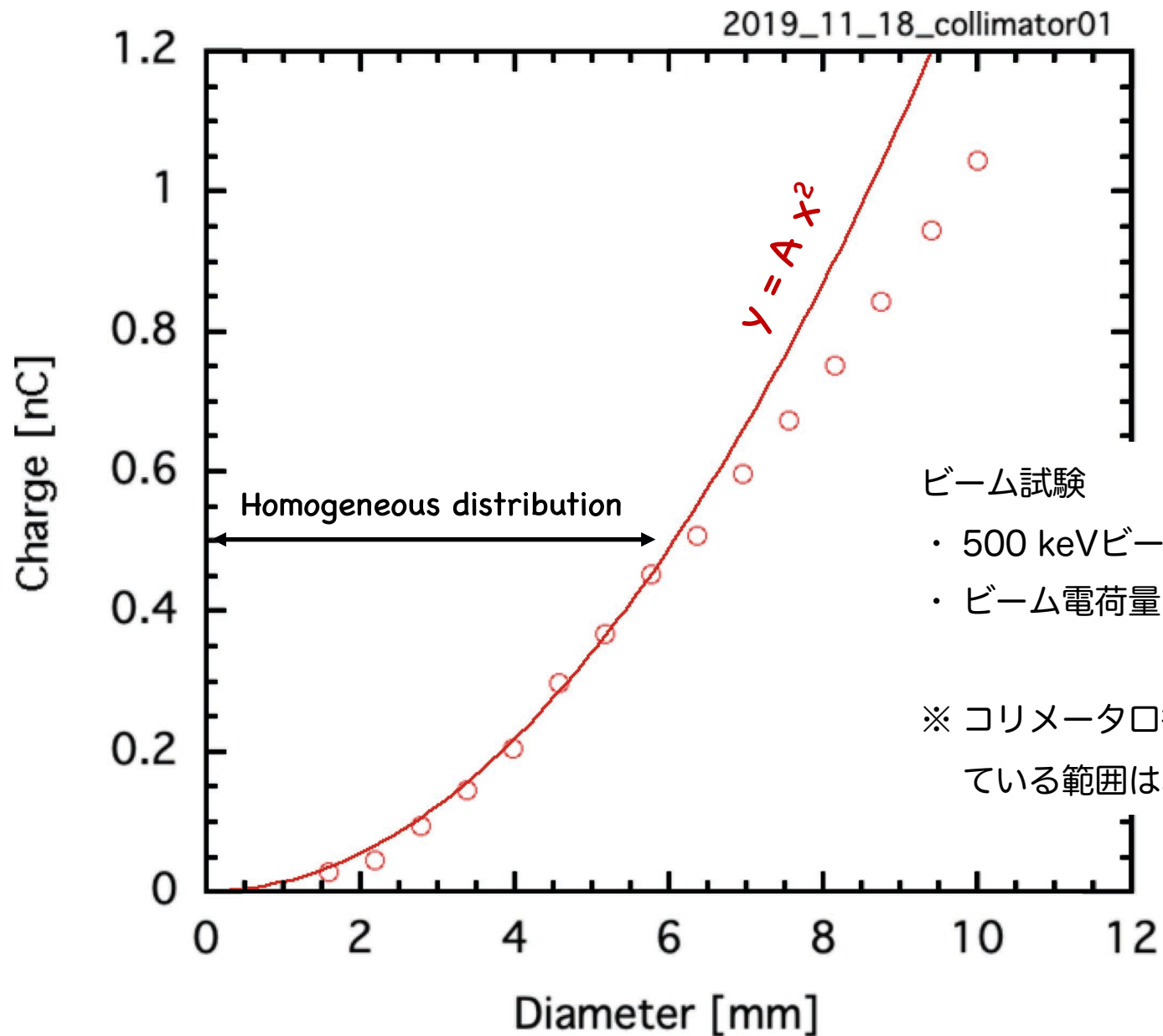
## Beam condition

- Beam charge / pulse width : 1.2 nC / 700 ps
  - Beam energy : 500 keV
  - Homogeneous distribution in transvers axis.
- 
- Cathode heater : 6.3 V / 1.52 A
  - HV (DC) : 42.3 kV (8.4 kV)
  - Bias (set) / Pulser (set) : 120 V / 450 V with 6 dB ATT
  - ML1 / ML2 : 15.0 A / 13.5 A

# コリメータサイズに対するビームサイズとビーム電荷量



# ビーム電荷量の調整



ビーム試験

- 500 keVビームをクリアカット
- ビーム電荷量の連続調整

※ コリメータ口径に対して、2次関数に一致している範囲は、ビーム強度分布が一様である。

## まとめ（電子銃・コリメータ）

---

- ▶ 高信頼性、高保守性、高輝度ビーム特性を備えた低エミッタンスRF電子銃の開発
  - ・ 50 kV電子銃 + 238 MHz RF空洞
  - ・ 50 kV電子銃では、低電圧設定により、大規模装置（SF6、絶縁油）が不要
- ▶ 低エミッタンスビーム生成の条件
  - ・ 市販のグリッド付き熱カソードを使用
  - ・ グリッド近傍レンズ効果を配慮した設計 → 「グリッド透明化」
  - ・ 横方向分布の一様性の維持
  - ・ 238 MHz RF空洞内でのビーム加速 → 空間電荷効果によるエミッタンス悪化を抑制
- ▶ 電子銃システムテストスタンドの構築、実証試験
  - ・ 500 keV、1 nCビーム生成
  - ・ スリットスキャンによるエミッタンス測定：1.7 mm mrad (rms, 60%)
- ▶ 連続可変ビームコリメータ
  - ・ ビーム電荷量の連続可変を実現



# 次世代放射光施設設計画の概要

七ヶ浜町  
多賀城市

仙台駅

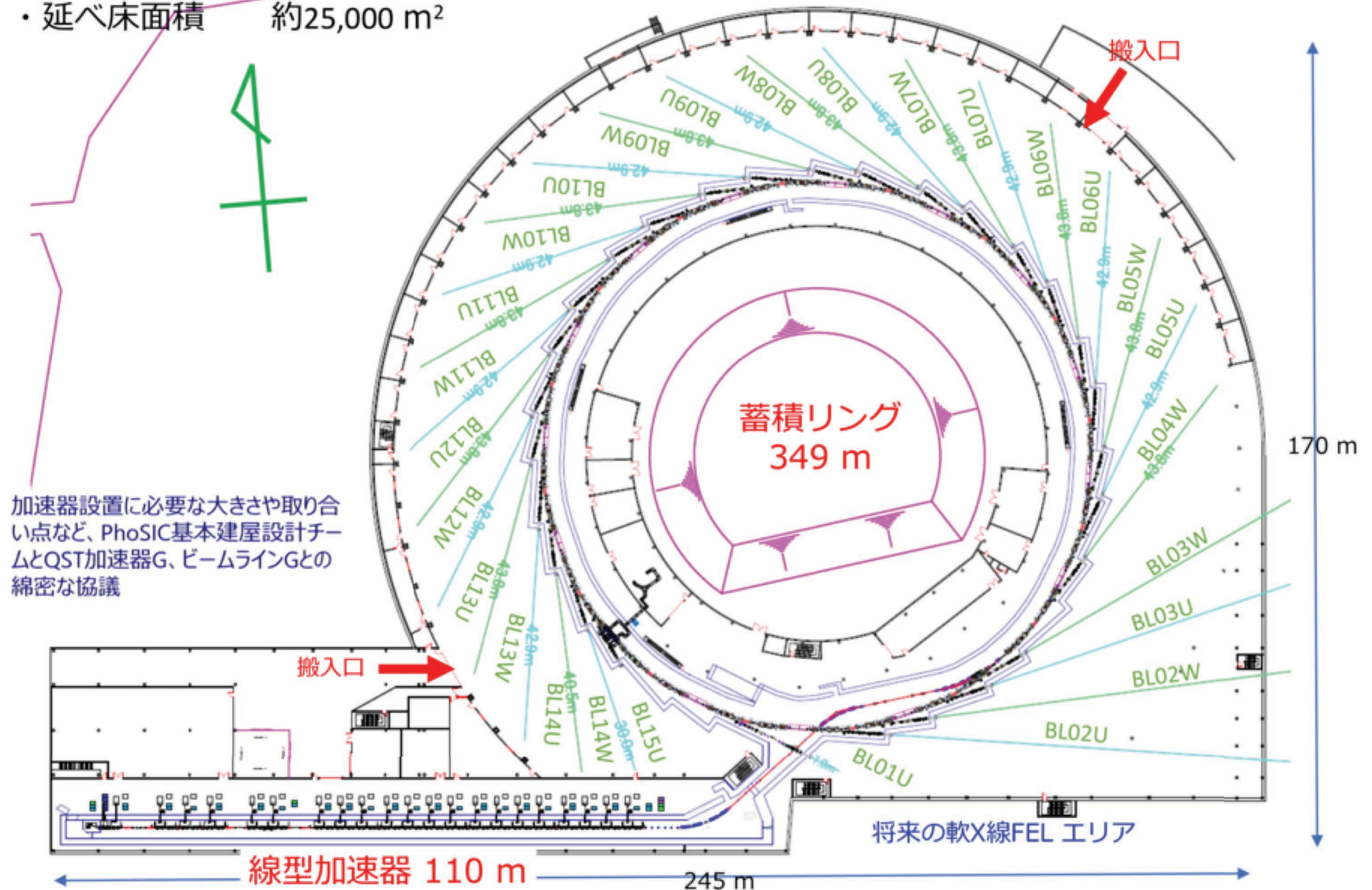
次世代放射光施設 立地場所  
東北大学青葉山新キャンパス  
仙台駅から地下鉄9分（青葉山駅）





# 次世代放射光施設 建屋設計

- ・地上2階、地下1階、鉄骨造
- ・延べ床面積 約25,000 m<sup>2</sup>



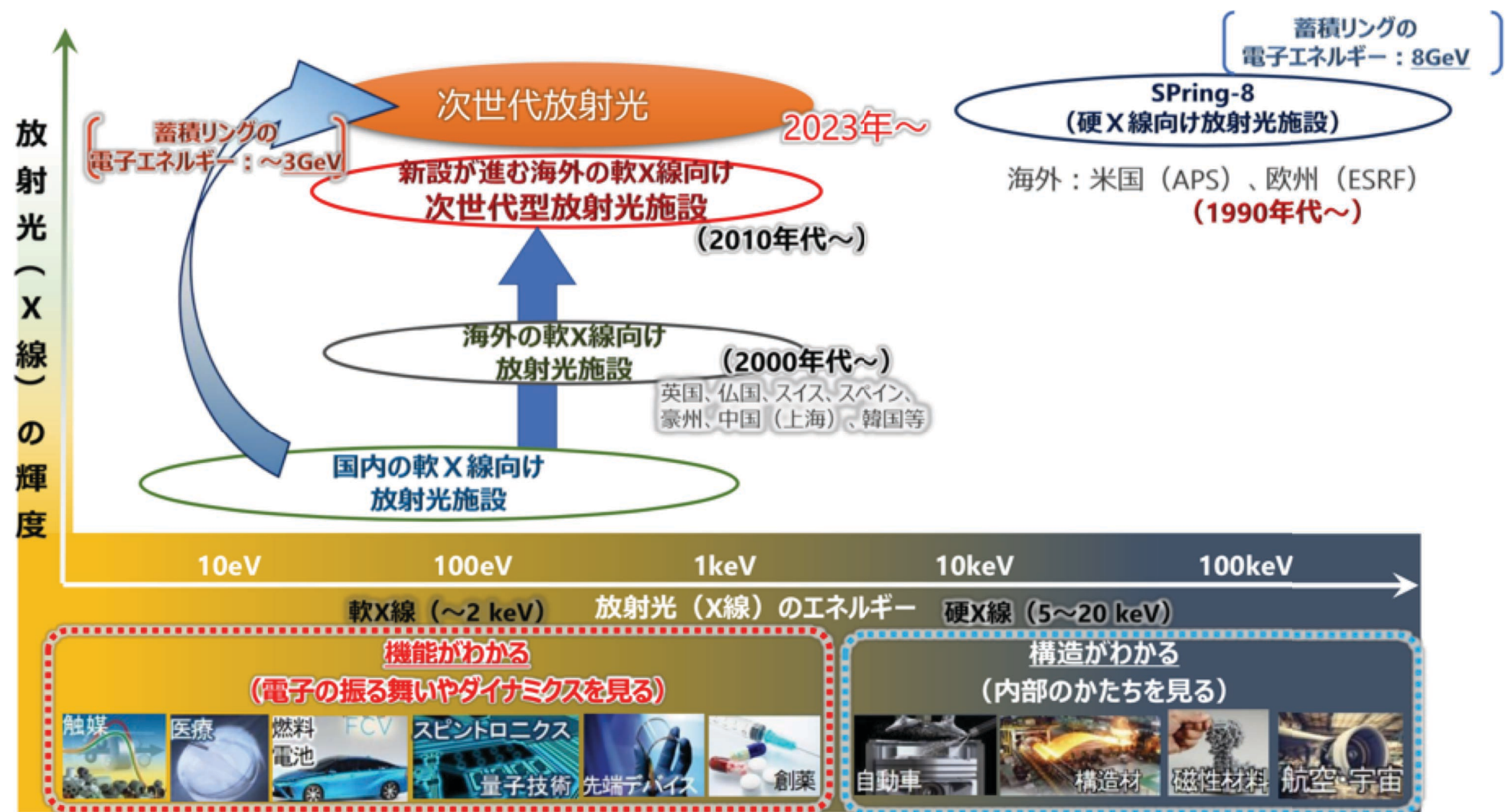




2021/09/06



# 次世代放射光施設計画の目指すもの



- 1) 先端性と安定性を兼ね備えたコンパクトな高輝度3GeV放射光源を整備し、放射光による世界レベルの最先端学術研究及び多彩な産業利用成果を創出する。
- 2) 国内の他放射光施設との役割分担や相補性を考慮し、「軟X線、コヒーレント光利用研究の促進」、「本格的産学連携」の推進、産業利用の拡大、「汎用測定の高スループット化」などに重きを置いた整備運用を行う。

# 官民地域パートナーシップ

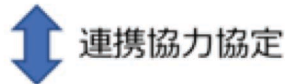
(官)

(民・地域)

**国**

「整備運用を進める  
国の主体」を指名

国立研究開発法人  
量子科学技術研究  
開発機構



連携協力協定

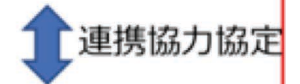
(理化学研究所)  
(JASRI)  
(KEK)



**パートナー**

2018年7月  
公募により選定

一般財団法人  
光科学イノベーションセンター  
(代表機関)



連携協力協定

(JASRI)  
(KEK)

宮城県

仙台市

国立大学法人 東北大学

東北経済連合会

2018年9月  
連携協力協定締結

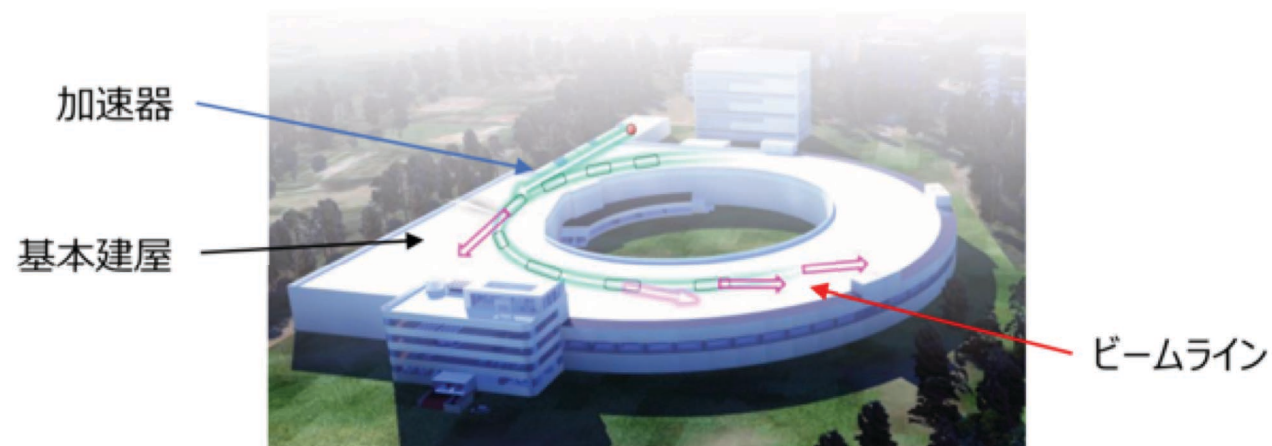


# 予算分担

項目	内訳	役割分担
加速器	ライナック、蓄積リング、輸送系、制御・安全	国において整備
ビームライン	当初10本 (国：3本 パートナー：7本)	国及びパートナーが分担
基本建屋 (研究準備交流棟機能を含む)	建物・附属設備	パートナーが整備
整備用地	用地取得・造成	

**総額：約370億円（国負担：約200億円、パートナー負担：約170億円）**

※整備期間中の業務実施費（建設工程の管理、事務管理費等）は除く



# 次世代放射光施設の整備スケジュール

## ▼ 国において整備

年度	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
加速器	施設調査 加速開発	整備着手	線型加速器製作		(据付・調整)		12月 ファーストビーム (ユーザー実験開始)  <共用開始>
			蓄積リング製作				
				線型加速器・蓄積リング輸送系			
				制御・安全装置			
ビーム ライン (3本)		仕様検討					

## ▼ パートナーにおいて整備

建屋		設計	建設				
ビーム ライン (7本)		仕様検討					<共用開始>
土地造成							



# 次世代放射光施設3 GeV線型加速器の設計理念

---

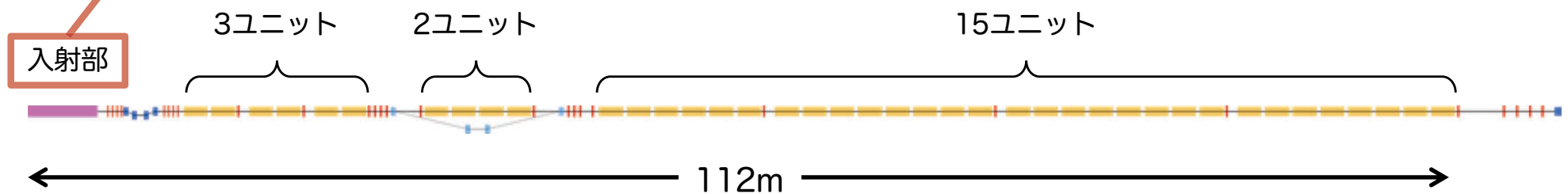
- ▶ 高稼働率を実現する加速器システム
  - ・ Top-up運転を前提（X線強度が安定であることは効率的な実験を可能とする）
  - ・ 高安定ビーム供給の実現
- ▶ 高い信頼性と優れた堅牢性、保守性を備えたシステム、運転経費の削減（省エネ化）
  - ・ 既存技術のみを使用・有効活用（グリッド付き熱電子銃、Cバンド加速ユニット）
  - ・ 施設冷却設備の仕様（低電力RFシステムのフィードバックによる安定化制御を前提）
  - ・ 少人数による運転管理、機器保守
- ▶ 建設コストの削減
  - ・ 全長が120 m以下のコンパクトな線型加速器（Cバンド高電界加速器を採用）
- ▶ 軟X線自由電子レーザーへの拡張性を配慮した設計
  - ・ 建屋はそのままの利用を前提
  - ・ 軟X線自由電子レーザーを想定した機器配置（バンチ圧縮システムの設置を予め想定）

以上の理念を念頭に置き、線型加速器の機器配置、最適化



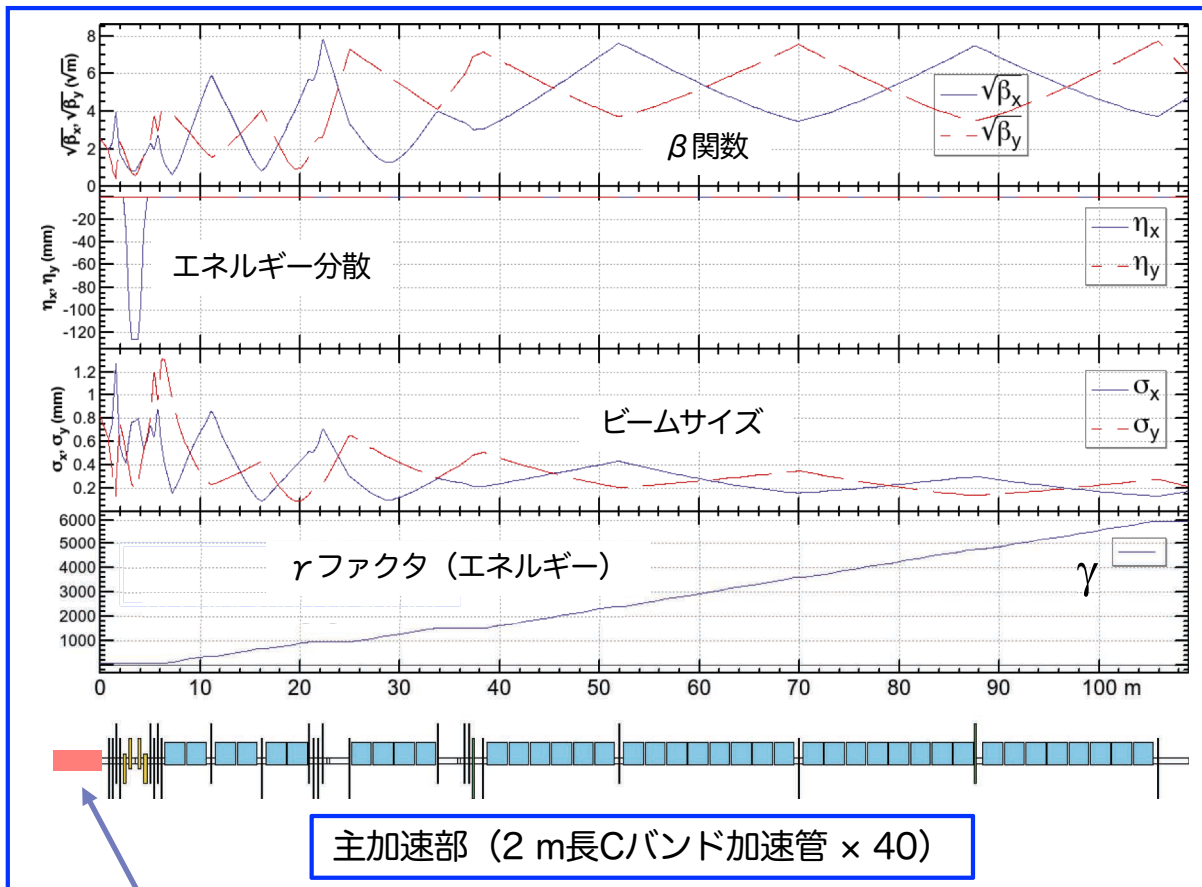
### 3 GeV線型加速器のビームパラメータと機器構成

項目	要求仕様 (リング入射)	SX-FEL
エネルギー	3 GeV	2.5 GeV
エネルギー幅	< 0.1% ( $\sigma$ )	0.01%
ビーム電荷量 / ピーク電流	0.3 nC	1.5 kA / 1 mm mrad
エミッタンス	< 10 mm mrad	3 kA / 2 mm mrad
バンチ長	< 5 ps	< 100 fs
繰返し周波数	1 Hz	10 Hz



- ▶ 全長112 m (30 MeV入射部+エネルギー測定用シケイン部+20台のCバンド加速ユニット)
  - ▶ Cバンド加速ユニット (SACLAと同型を使用)
    - ・ 50 MWクライストロン+RFパルス圧縮器+2本の2 m長Cバンド加速管
    - 加速勾配 : 42 MV / m → 18台の加速ユニットで3 GeV到達
    - ・ クライストロンや変調器電源の故障時にも、ビーム入射継続可能とする2台の待機加速ユニットを用意
- ※ 線型加速器のビーム電荷量、エミッタンスは、入射部におけるビーム性能により決定

# 3 GeV線型加速器のビームオプティクス計算・最適化



主加速部 (2 m長Cバンド加速管 × 40)

30 MeV入射部

3 GeV線型加速器

3 GeV蓄積リング

ビーム輸送系

112 m

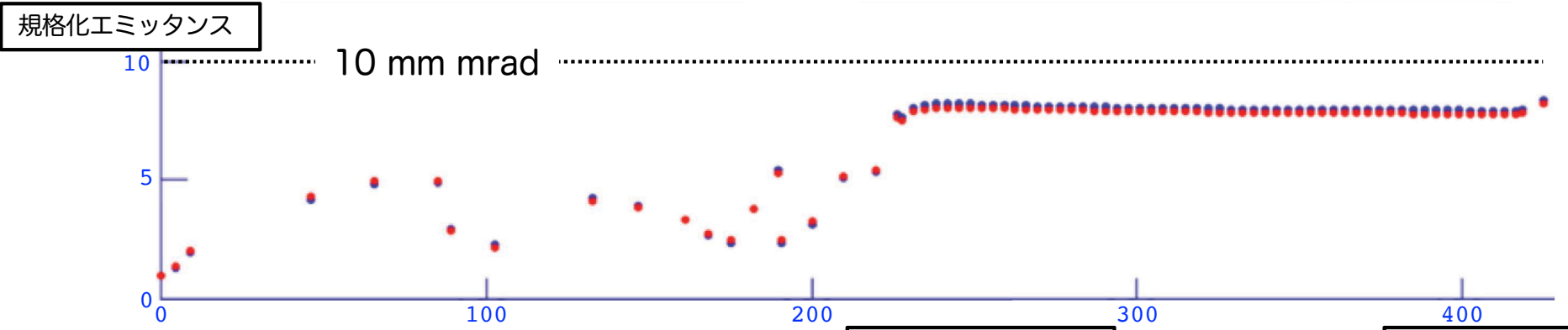
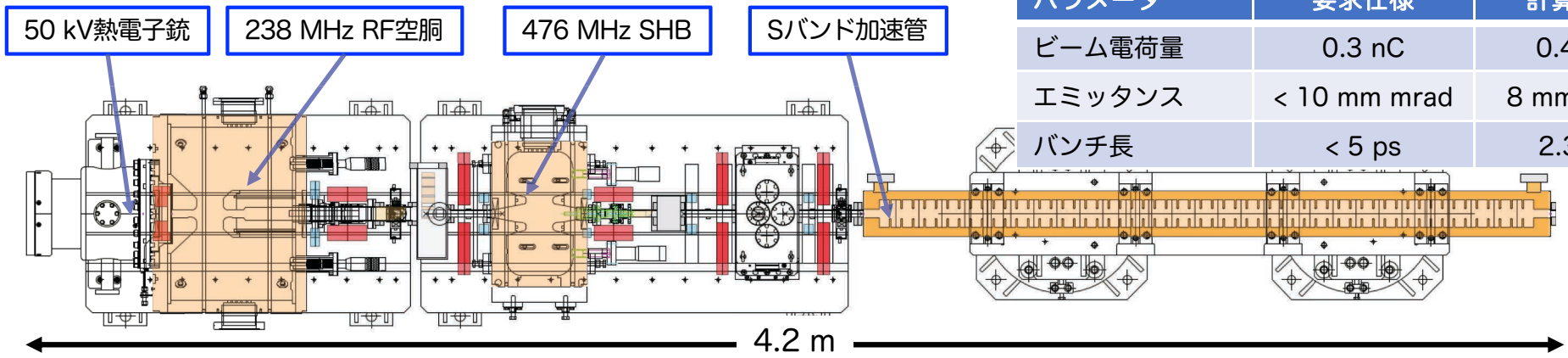
## オプティクスの基本設計

- 基本ラティス構造はFODO
  - Q電磁石の台数削減
- 軟X線自由電子レーザーへの拡張を想定
  - 2式のバンチ圧縮システムを配慮
- ビーム輸送効率: 100% (~ 0.3 nC)

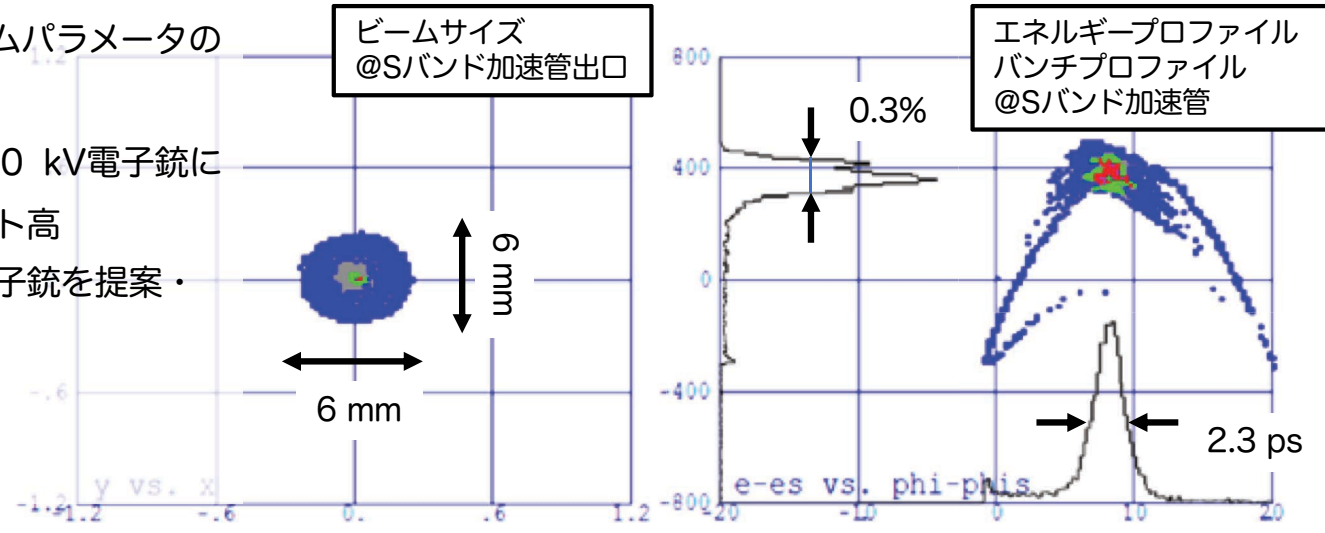
※ 建屋建設において、加速管、クライストロンなど、全ての機器配置は、この計算結果を反映している。

# 30 MeV入射部の設計

パラメータ	要求仕様	計算結果
ビーム電荷量	0.3 nC	0.4 nC
エミッタンス	< 10 mm mrad	8 mm mrad
バンチ長	< 5 ps	2.3 ps



- ・従来型入射器（電子銃）では、要求ビームパラメータの達成は困難
- ・光陰極型RF電子銃、またはSACLAの500 kV電子銃により可能となるが、製作・維持管理コスト高
- ➔既存技術のみ使用した低エミッタンス電子銃を提案・開発（すでに開発完了）
- ・新電子銃を用いた入射部の設計
- ➔簡易な調整で高品質ビーム生成



# 蓄積リングNewSUBARUのための新入射器

新型電子銃を用いた入射部をNewSUBARU新入射器として先行採用

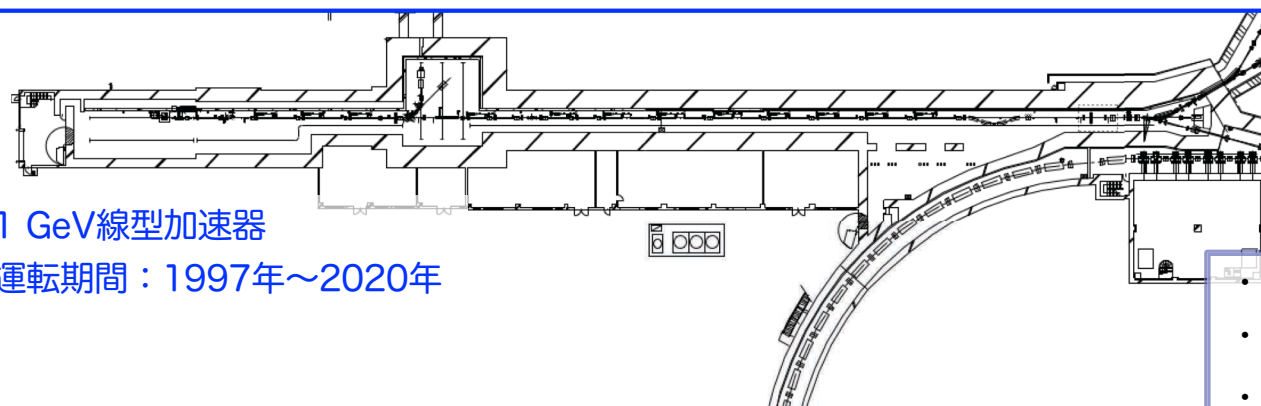
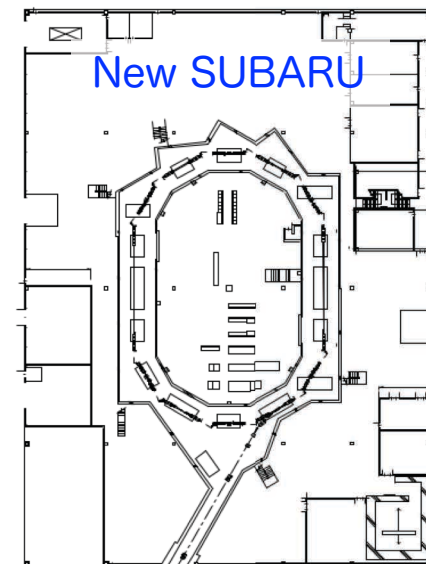
- ・ 次世代放射光施設3 GeV線型加速器のプロトタイプとしての役割
- ・ ビームコミッションの結果、利用施設加速器としての性能を確認

## ▶ NewSUBARU新入射器建設の概要

- ・ 1 GeV線型加速器の停止にともない、NewSUBARU専用入射器の設置
- ・ 高安定、高信頼、コンパクトな線型加速器であること。
- ・ 省エネルギー運用、少人数での運転管理、保守性に優れていること。
- ・ 3GeV線型加速器と共通した設計理念とする。

## ▶ 建設・ビームコミッションスケジュール

- ・ 2017年 加速器の設計開始
- ・ 2018年 クライストロンギャラリ建屋建設
- ・ 2020年9月 加速器機器の設置
- ・ 2021年1月 RFコンディショニング
- ・ 2021年2月 ビームコミッション開始（3月に蓄積ビーム確認）
- ・ 2021年4月 利用運転開始



1 GeV線型加速器

運転期間：1997年～2020年

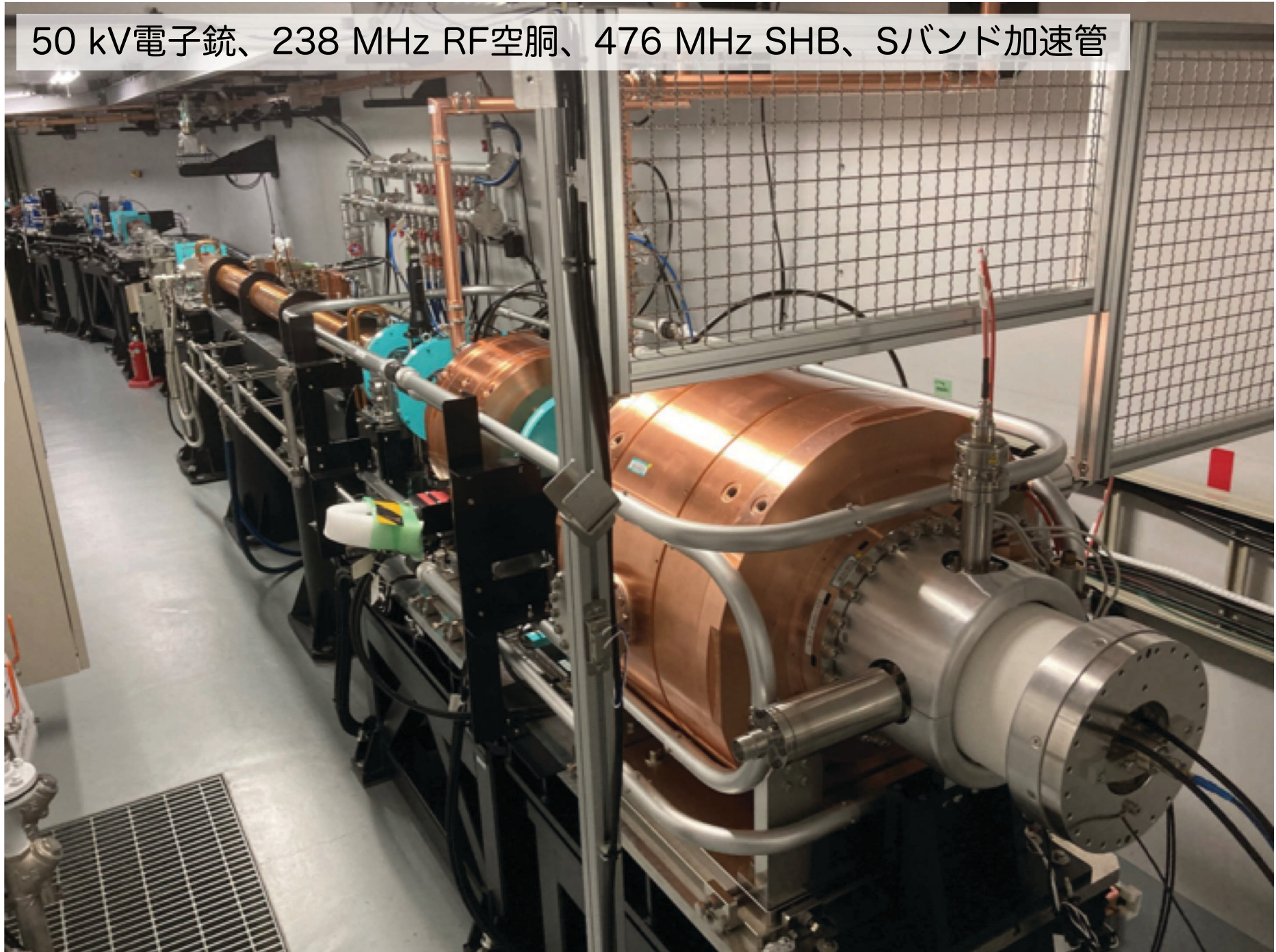
新入射器設置場所  
既存建屋の旧ビーム輸送部に設置

- ・ ビームオプティクス計算、機器配置、設計
- ・ 精密アライメント、付帯設備設計、製作
- ・ 機器組立、配線など



# NewSUBARU新入射器

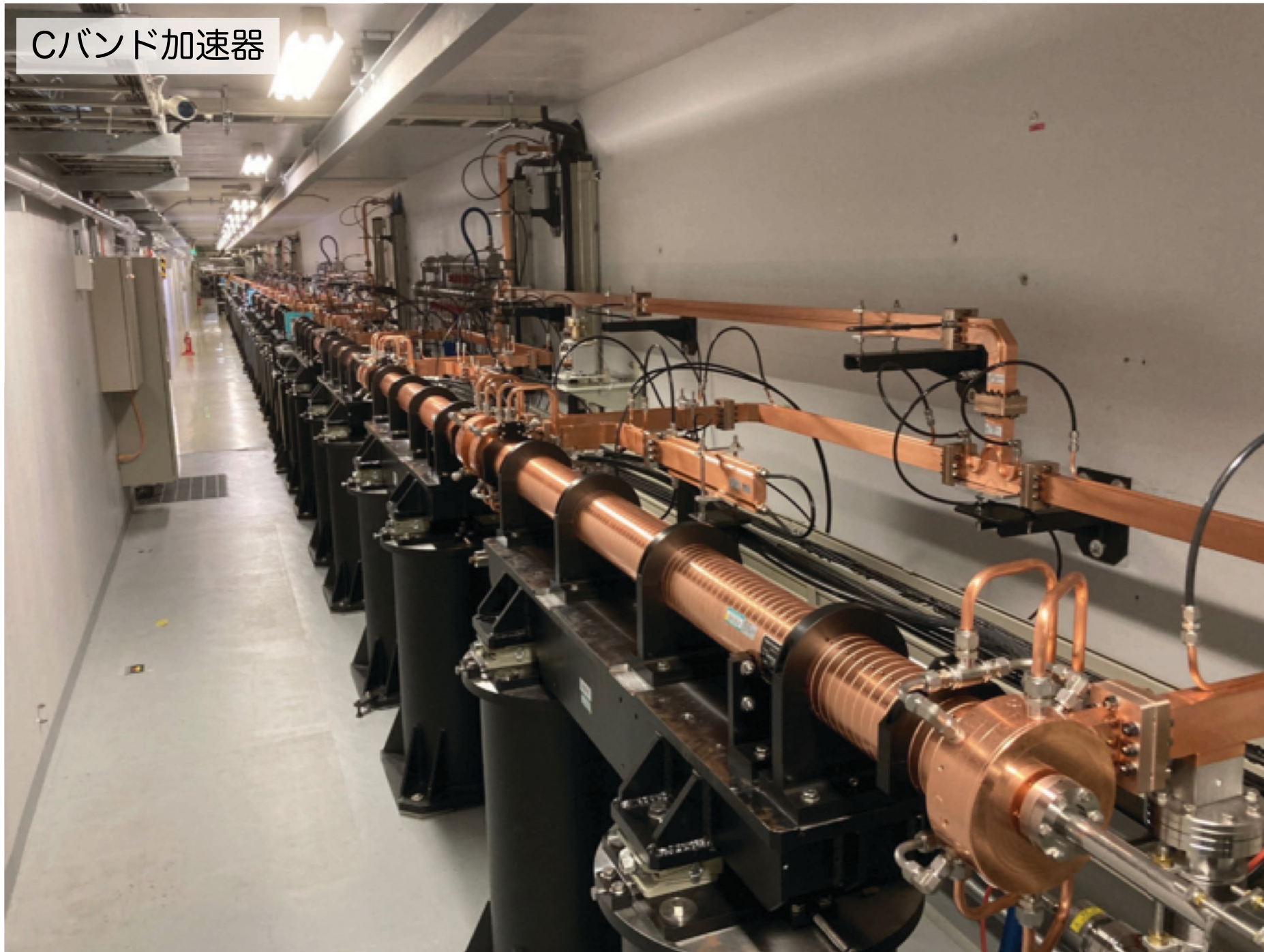
50 kV電子銃、238 MHz RF空胴、476 MHz SHB、Sバンド加速管



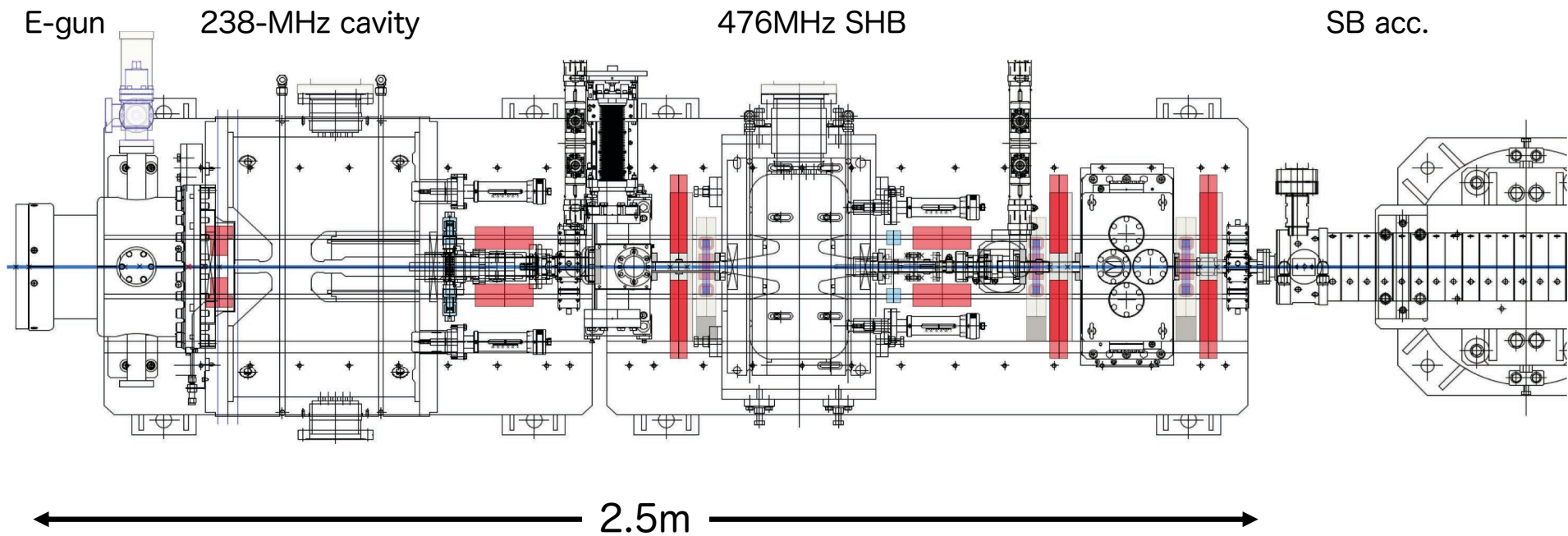


# NewSUBARU新入射器

Cバンド加速器

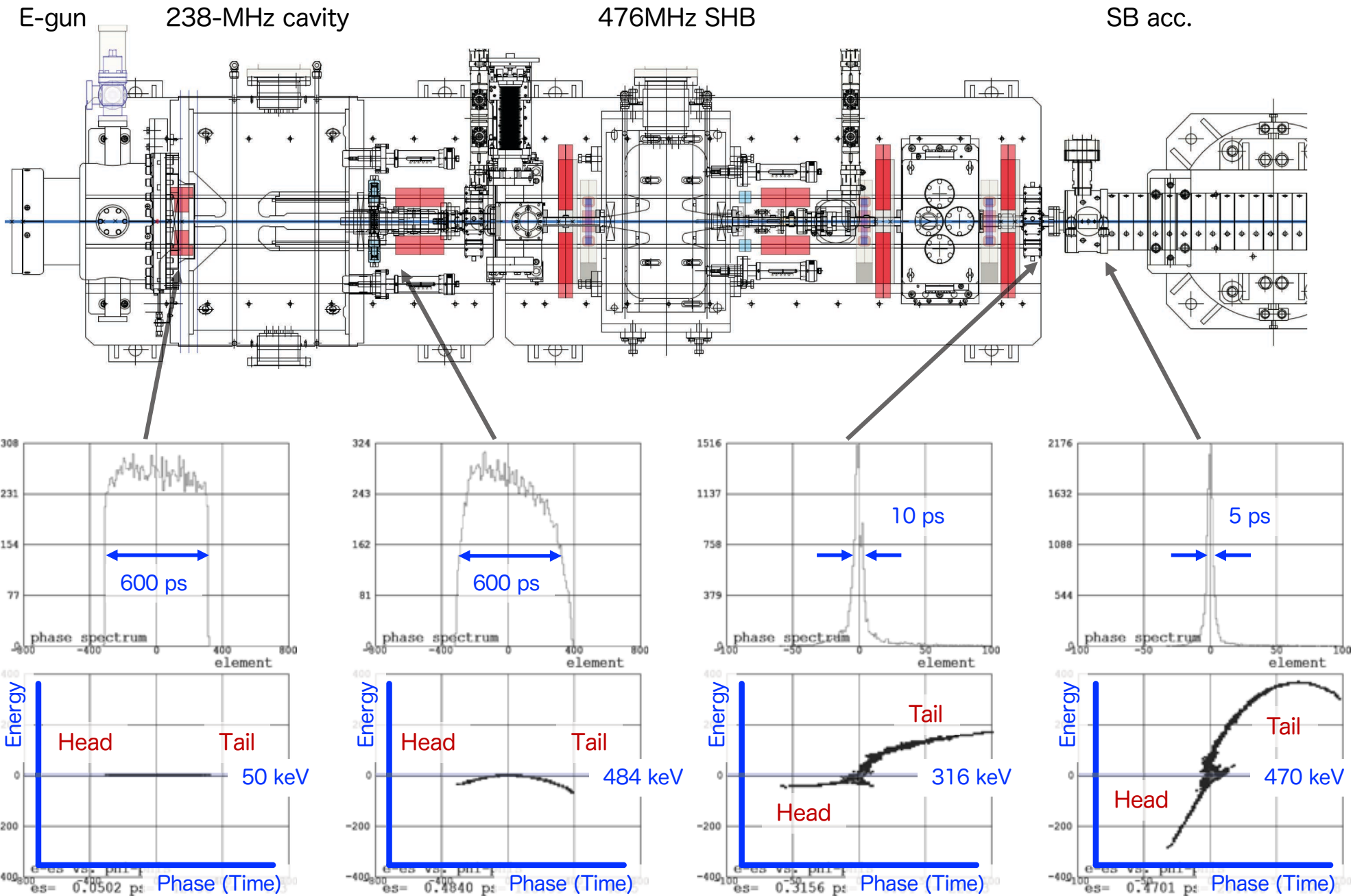


# 入射部レイアウトとビームパラメータ



Beam parameter	Design	Measurement (typical)
Beam charge	~ 0.4 nC	0.3 nC
Energy	55 MeV	55.5 MeV
dE/E	< 1%	1.2%
Bunch length	5 ps (FWHM)	< 5 ps
Normalized emittance	7 mm mrad	7 - 10 mm mrad

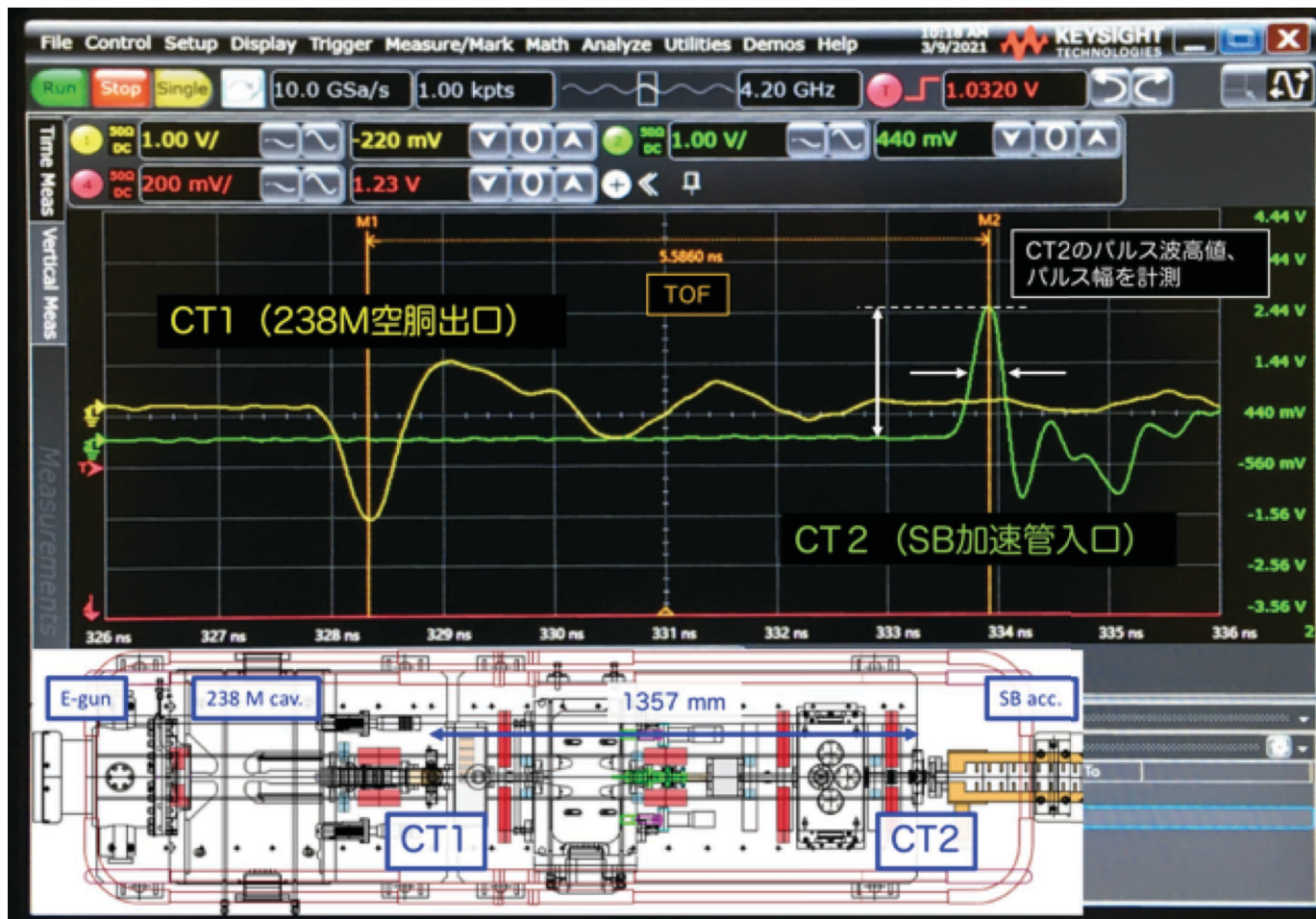
# 速度変調によるビームバンチング





# 入射部ビーム調整 (RF位相)

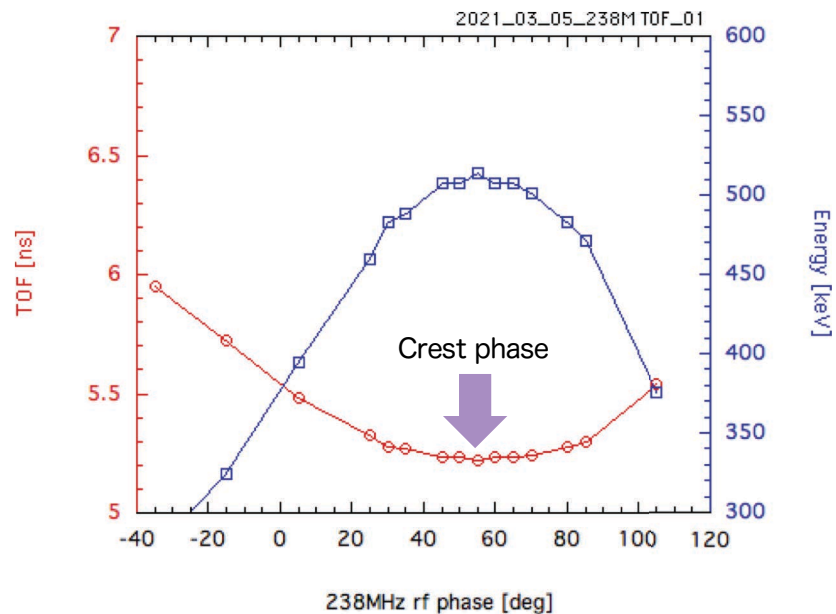
RF component	Measurement
238 MHz cavity	TOF
476 MHz SHB	TOF, Pulse height of CT
SB accelerating structure	Energy profile (SCM after BM)



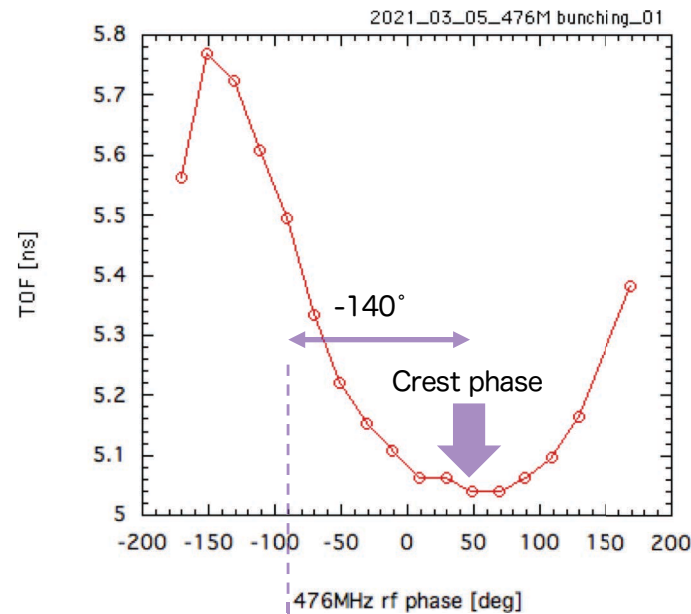


# 入射部ビーム調整 (238 MHz空胴 & 476 MHz空胴 位相の最適化)

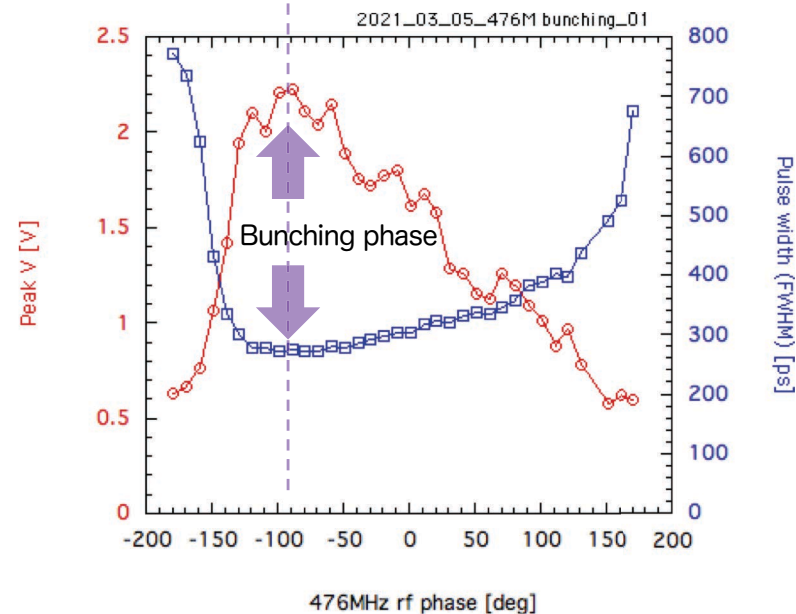
▼ TOF measurement (238 MHz rf cavity)



▼ TOF measurement (476 MHz SHB)



▼ Signal level of CT2 (476 MHz SHB)

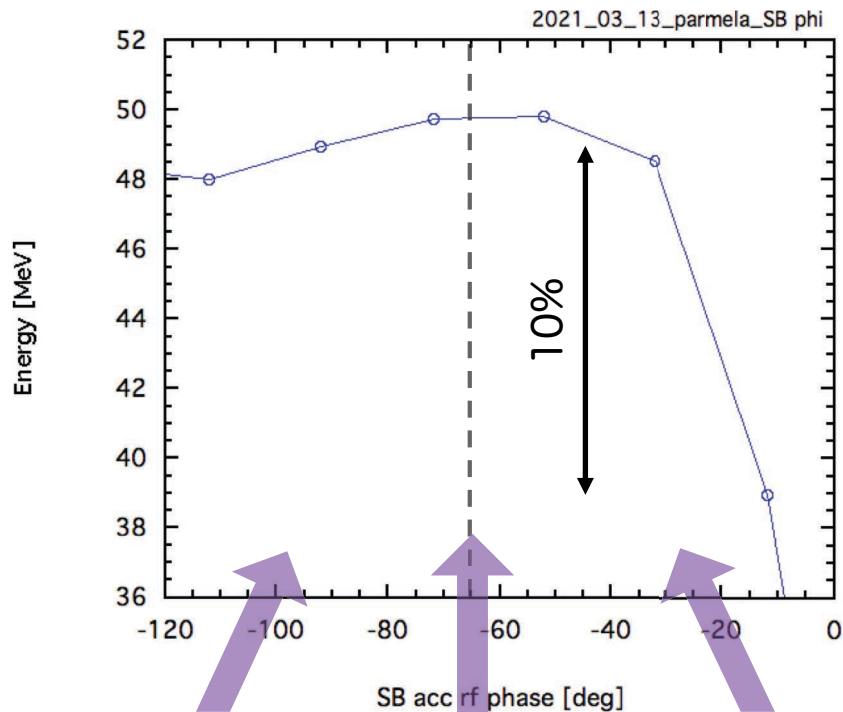


$$\beta = \frac{L}{\Delta t} \frac{1}{c}$$

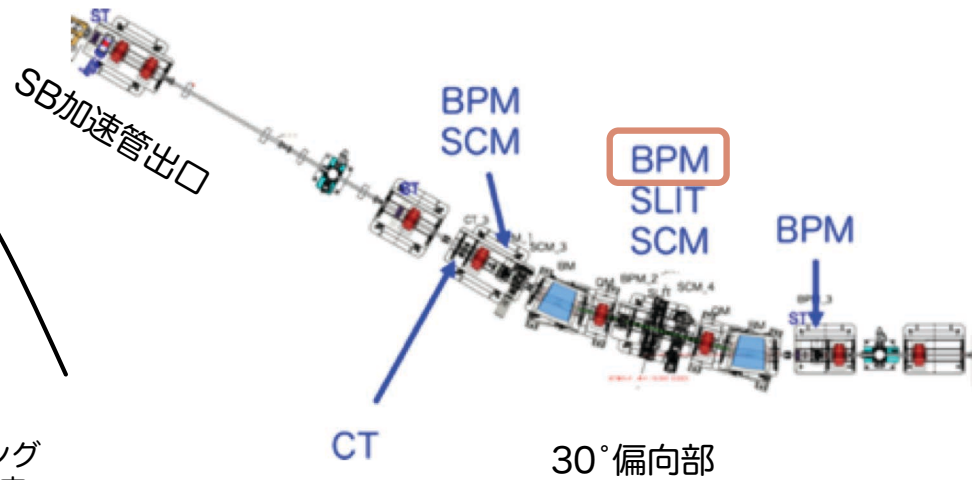
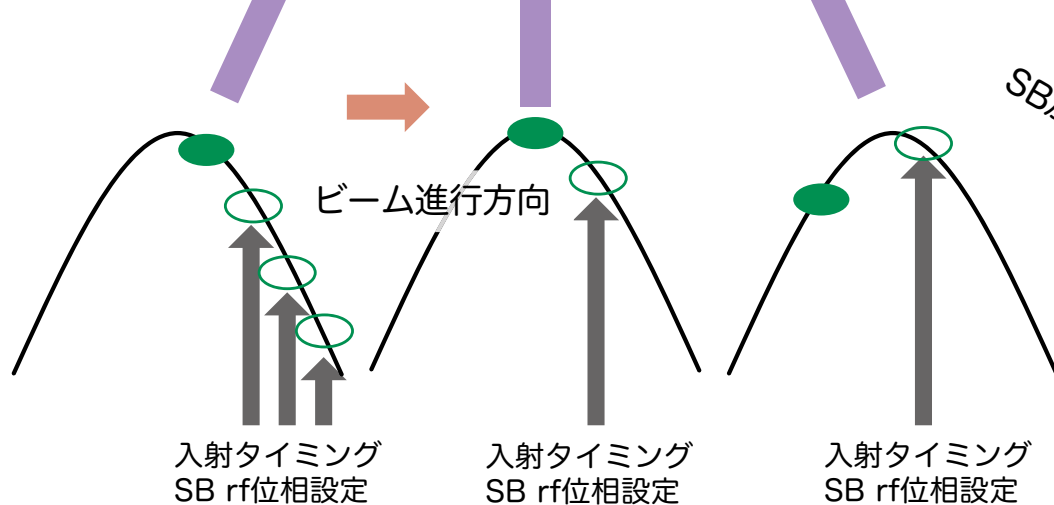
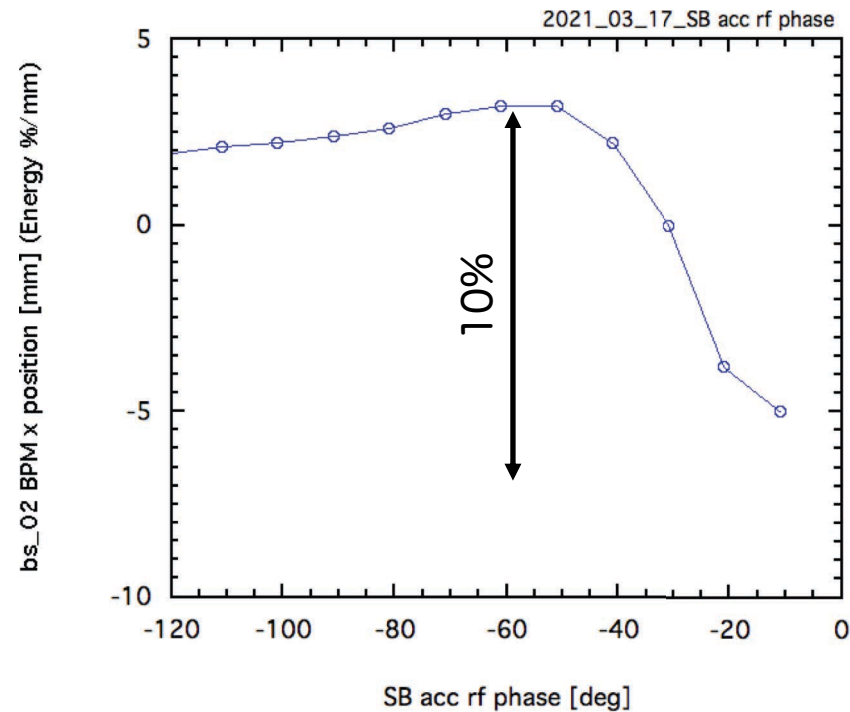
$$E = \frac{0.511}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 0.511$$

# 入射部ビーム調整 (Sバンド加速管 位相の最適化)

## ▼ PAEMELA simulation



## ▼ Measurement result







## まとめ（次世代放射光施設、プロトタイプ加速器）

---

- ▶ 次世代放射光施設
  - ・ 建屋建設（2022年3月に引き渡し）
  - ・ 加速器構成機器の製作
  - ・ 2022年3月より機器設置開始
- ▶ 次世代放射光施設用3 GeV線型加速器（プロトタイプとしてのニュースバル新入射器）
  - ・ 3週間のビームコミッショニングで設計性能に到達
  - 2021年4月からの放射光利用運転において、
  - ・ 再調整することなく、安定したビーム供給を実現
  - ・ 入射部においては、機器異常によるビーム供給停止なし

## Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode

Takao Asaka,<sup>1,2,3,\*</sup> Takahiro Inagaki,<sup>1,2</sup> Tamotsu Magome,<sup>1,2,3</sup> Nobuyuki Nishimori,<sup>3</sup> Yuji Otake,<sup>2</sup> Tsutomu Taniuchi,<sup>2</sup> Kenich Yanagida,<sup>2</sup> and Hitoshi Tanaka<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

<sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan

<sup>3</sup>National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

 (Received 26 March 2020; accepted 9 June 2020; published 23 June 2020)

We developed an electron gun system capable of delivering high brightness beams to drive soft x-ray free-electron lasers (SXFEL). We modified the conventional radio-frequency (rf) gun concept by using a 50-kV gun with a gridded thermionic cathode connected with a 238-MHz acceleration cavity. We achieved a low target emittance by applying the following two methods: (1) to obtain a parallel beam after the control grid, we optimized the grid voltage to compensate for the electric potential distortion near the grid (i.e., the lens effect); and (2) to avoid emittance growth due to the space charge effect at low energy regions, the 50-kV gun was connected to a 238-MHz rf cavity with a minimum distance, which immediately accelerated the beam energy to 500 keV. We built a gun test stand to verify the high beam performance, i.e., a normalized emittance of less than 4 mm mrad with a bunch charge of 1 nC and a pulse length shorter than 0.7 ns, as predicted by CST and PARMELA codes. Our proof-of-performance experiments demonstrated that a projection emittance of 1.7 mm mrad was obtained as a core part, representing 60% of all extracted electrons and the measured emittance agreed well with the simulation value of 2.0 mm mrad. This paper presents an overview of the electron gun system and our proof-of-performance experimental results.

DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.23.063401

Japanese Journal of Applied Physics **60**, 017001 (2021)

<https://doi.org/10.35848/1347-4065/abd0c9>

REGULAR PAPER



## Transparent-grid scheme for generating cathode-emittance-dominated beams in a gridded thermionic gun

Takao Asaka<sup>1,2,3</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>1\*</sup>, Takahiro Inagaki<sup>2,3</sup>, Yuji Otake<sup>3</sup>, and Hitoshi Tanaka<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

<sup>2</sup>RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5148, Japan

<sup>3</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 679-5198, Japan

\*E-mail: [nishimori.nobuyuki@qst.go.jp](mailto:nishimori.nobuyuki@qst.go.jp)

Received October 1, 2020; revised November 24, 2020; accepted December 3, 2020; published online December 23, 2020

A transparent-grid scheme is proposed for generating cathode-emittance-dominated beams in a gridded thermionic gun. In the proposed scheme, the grid emittance arising from the potential difference between the grid and grid-mesh center is suppressed by tuning the grid voltage to the gridless gun potential. We developed a 50 kV gridded thermionic gun that is followed by a 238 MHz cavity for 500 kV acceleration. The measured projected emittance as a function of grid voltage shows a clear minimum approaching the cathode emittance and agrees well with a numerical simulation and a theoretical grid emittance taking into account the longitudinal space-charge effect. The measured minimum emittance for a core part which represents 60% of a 1-nC electron bunch is 1.5  $\mu\text{m} \cdot \text{rad}$  making the transparent-gridded thermionic gun a promising electron source for high brightness beam application such as a soft X-ray free-electron laser. © 2020 The Japan Society of Applied Physics

電子銃に関する内容は、PRAB、JJAPにてご覧いただけます。

ご静聴、ありがとうございました。

