



加速器が切り拓く先端科学と産業応用

2024年3月23日(土)

@西早稲田キャンパス63号館

鷲尾方一

Masakazu Washio

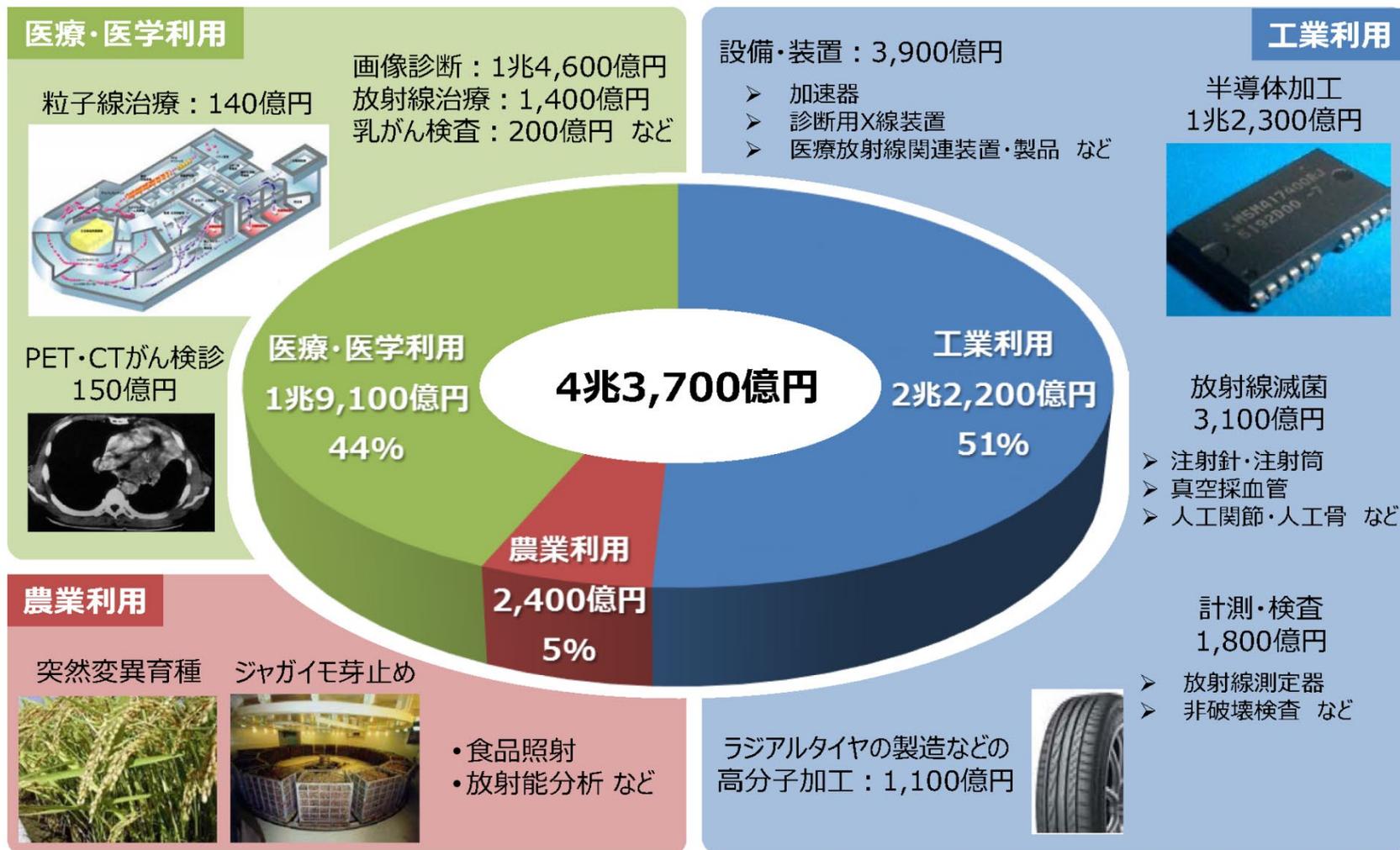
早稲田大学理工学術院先進理工学部 応用物理学科
早稲田大学理工学術院先進理工学研究科 共同原子力専攻

第18回未来エネルギーフォーラムシンポジウム



日本における原子力放射線利用の経済規模

平成27年度の放射線利用の経済規模



内閣府HPより引用

早稲田大学におけるプロジェクト(先端加速器開発)



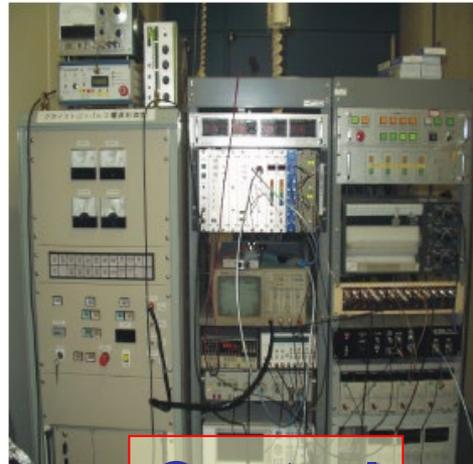
- 1999~ 文部科学省、私立大学高度化推進事業
ハイテクリサーチセンタープロジェクトスタート
“高品質ビームの発生とその物性・反応研究への応用”
- 2000/9 建屋完成
- 2001~ RFガン等、装置設置
- 2002/4 放射線施設認可 ビーム実験開始
- 2003/1 逆コンプトン散乱X線発生に成功
- 2003/10 ピコ秒パルスラジオリシスシステム開発
- 2004/4 ハイテク第2期 承認
- 2005- パルスラジオリシス及び逆コンプトンX線システム高度化
- 2006- RFガンの高度化研究開始
- 2008 新型RFガン運転スタート
- 2008 JSTプロジェクトスタート(逆コンプトン)
- 2012 ECC RF-gun 成功 THz波にむけて!
- 2013~2016 JSTプロジェクト(第2期)
- 2016 NEDO プロジェクト(大出力レーザー開発)
- 2021 JST SICORP スタート

高品質ビームは何の役に立つのか? ⇒ KEK とのコラボレーション

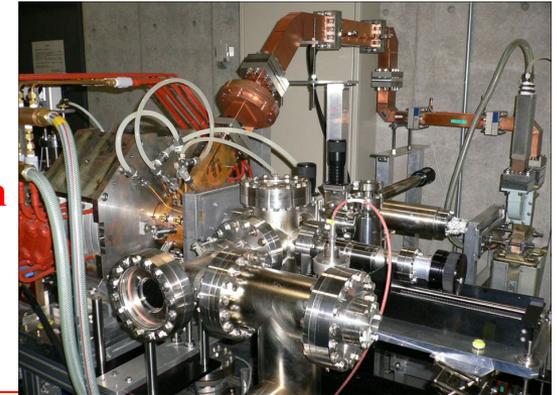
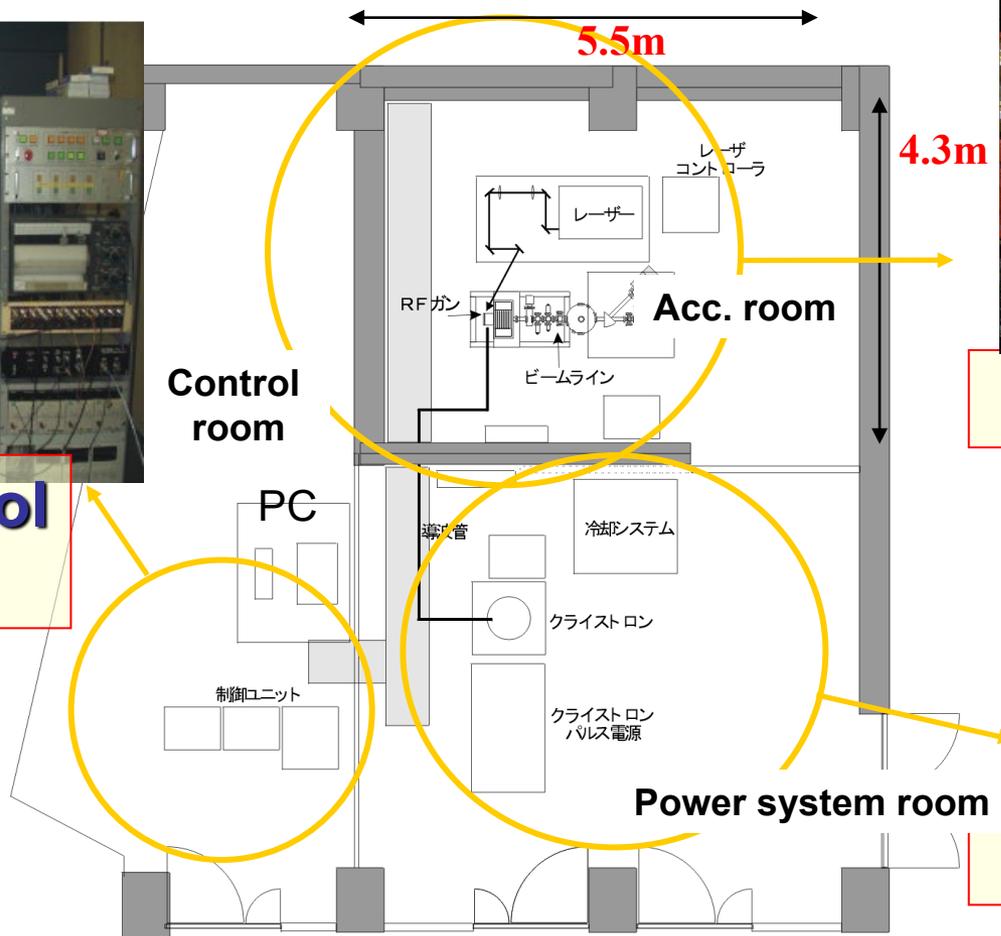
- 高品質電子ビームを発生 ⇔ 高エネルギー物理学(ILC等)からの強い要請。
(すでにKEKの高エネルギー電子ビーム発高生システム(ATF)にRF-Gunが組み込まれている。)
- 高度なビーム診断法を確立するための重要なTool
- パルスラジオリシスのような超高速物理化学現象の解明に大きな役割を果たす。
- 高度な2次ビーム(X線等)発生を効果的に行うことができる。



Facility Layout at Washio Lab. in Waseda University



Control unit



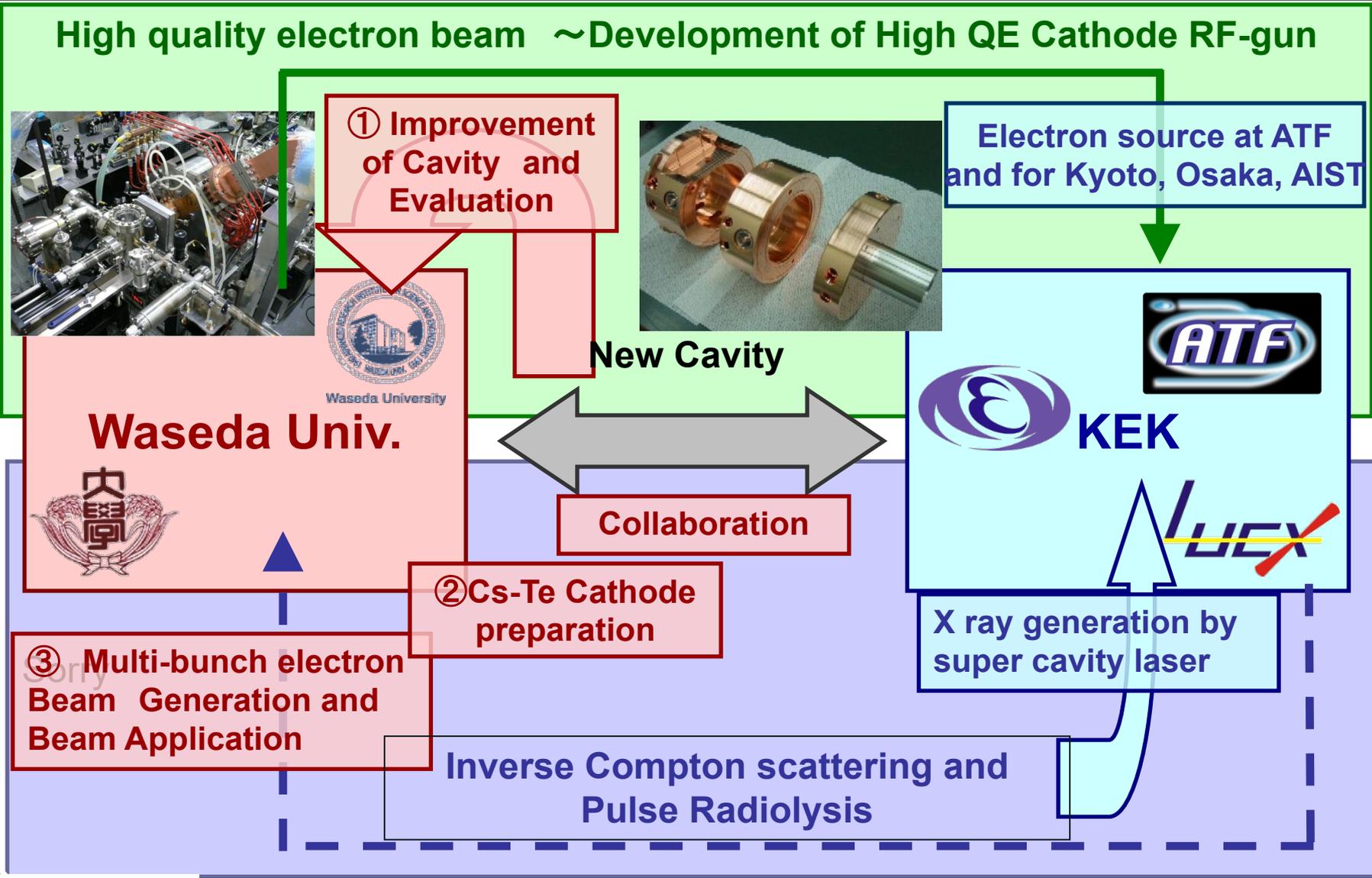
RF-gun system



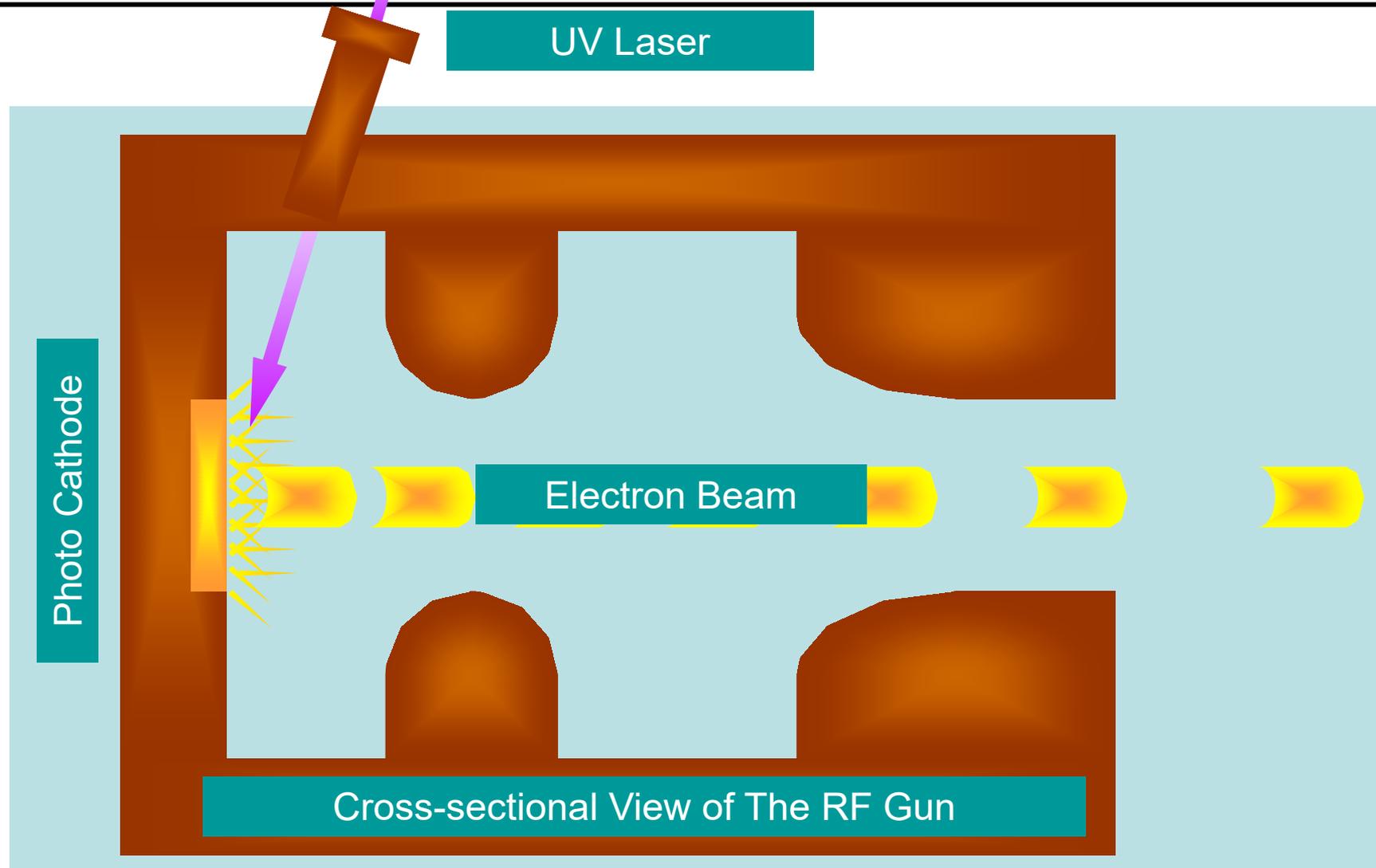
Klystron & Modulator



KEK Collaborations

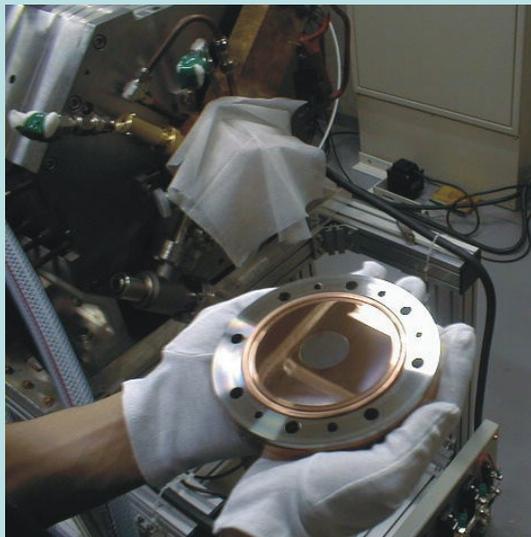


RFガン(世界最小最軽量クラスのRF加速器)動作

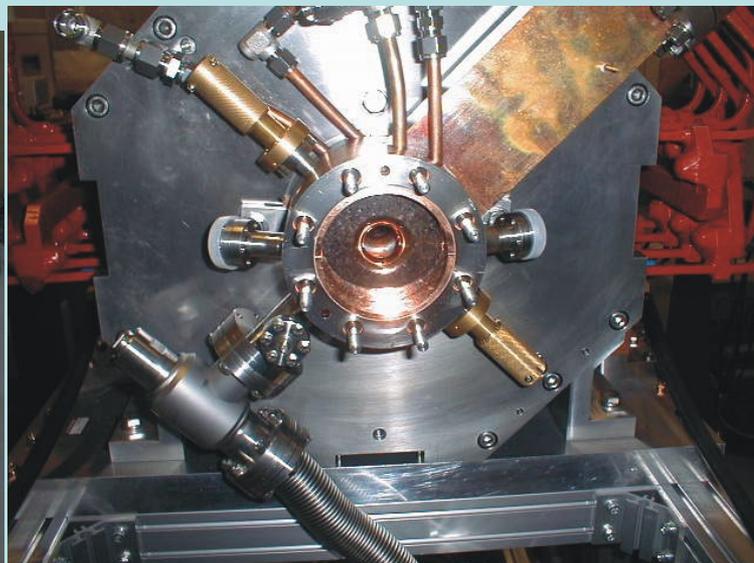


初代RFガンの設置の様子

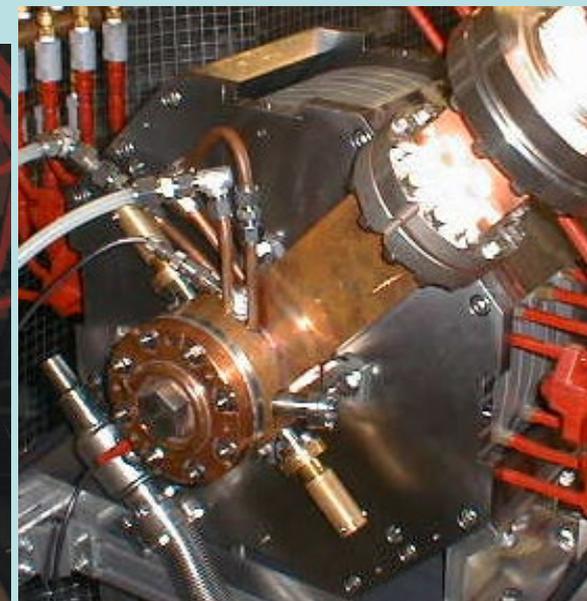
RF Gun Assemble



Cathode Plate



RF-gun Cavity without Cathode



RF-gun

フォトカソード開発

初代RFガンのカソードはMgカソードであった

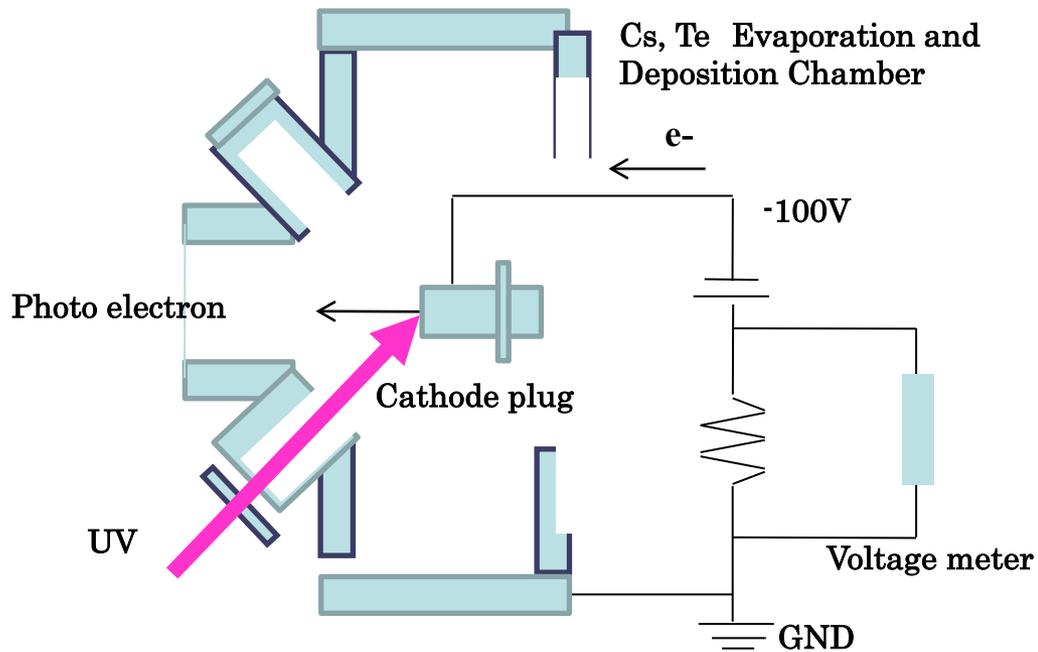
⇒ 量子収率が 10^{-4} 程度しかない！

2号機には、ロードロックを備えた、Cs-Teカソードを用いた

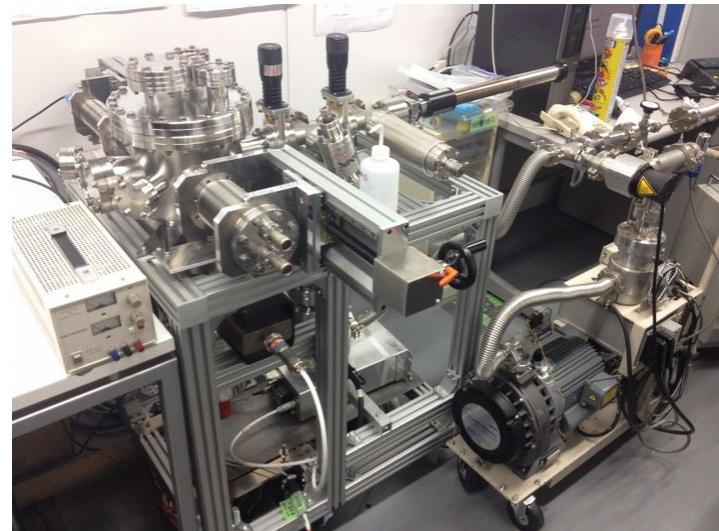
⇒ このカソードは量子収率が数パーセントまで実現できる

その後、種々のカソード開発にチャレンジしたが、実用に至っていない

Cs-Te Cathode Preparation



QE Measurement setup

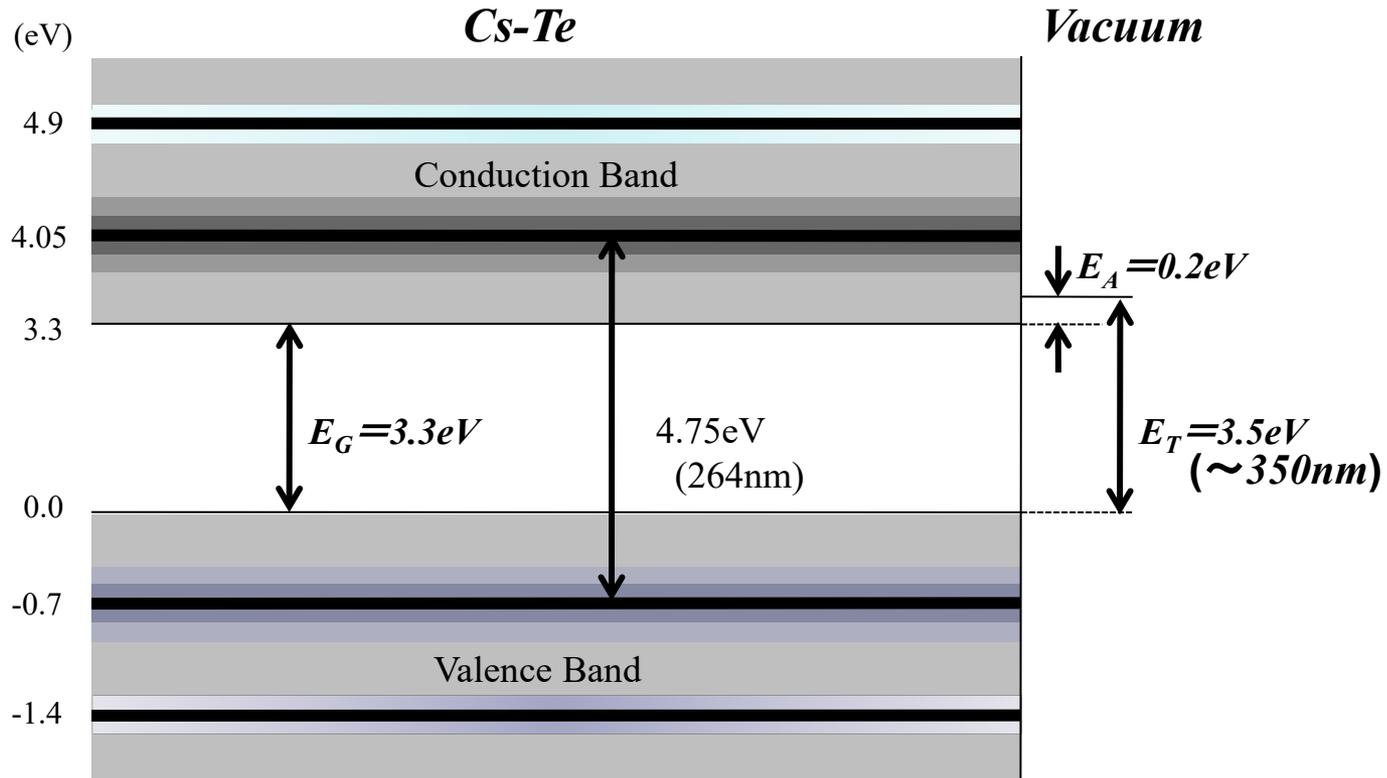


蒸着チャンバー



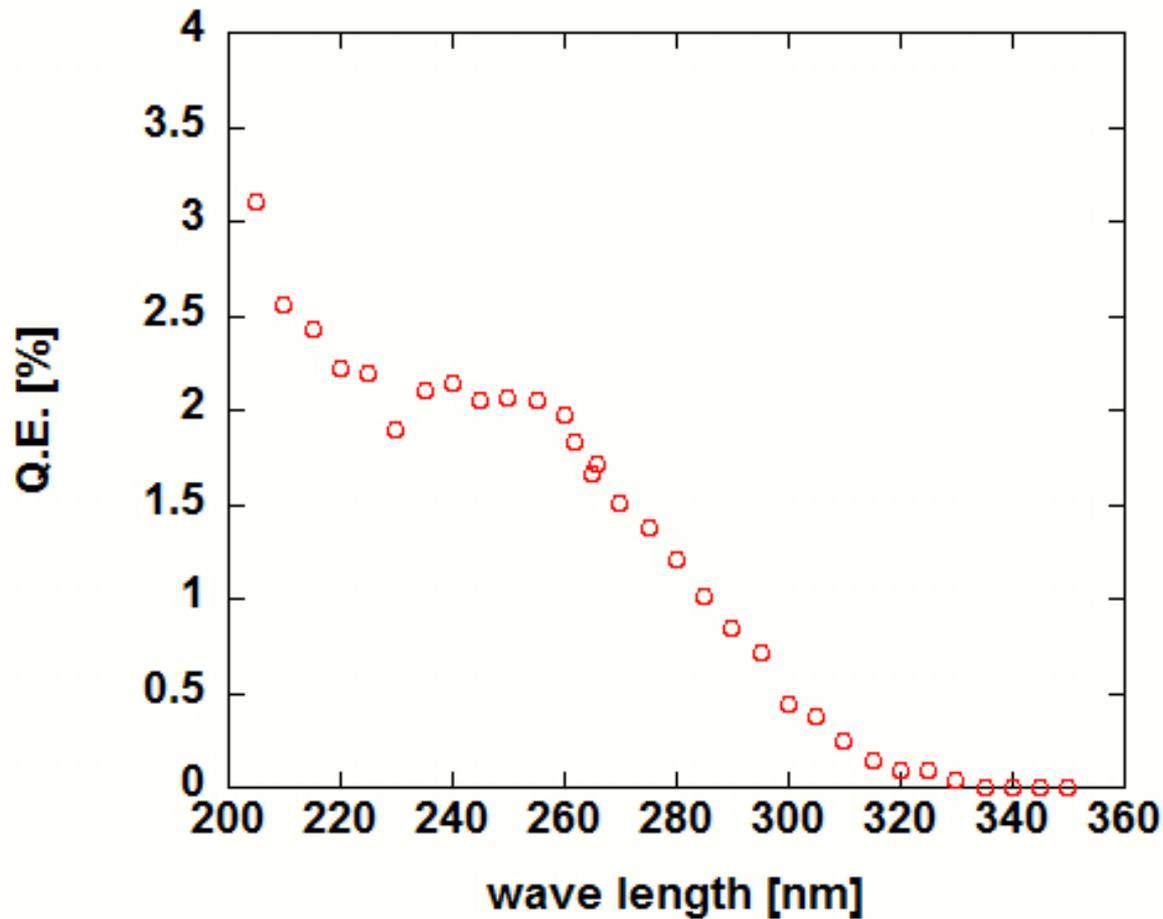
輸送システム

Cs-Te Cathode Preparation



Band structure of Cs-Te

Cs-Te カソードの量子効率試験

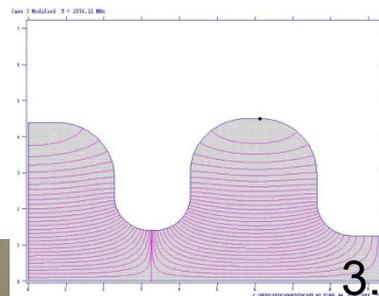
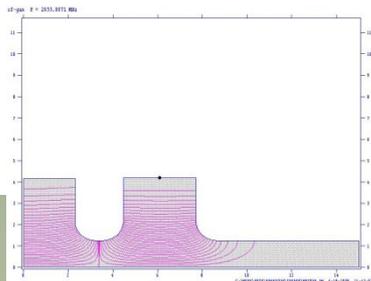


QE Measurement results during the Cathode preparation

電子銃開発



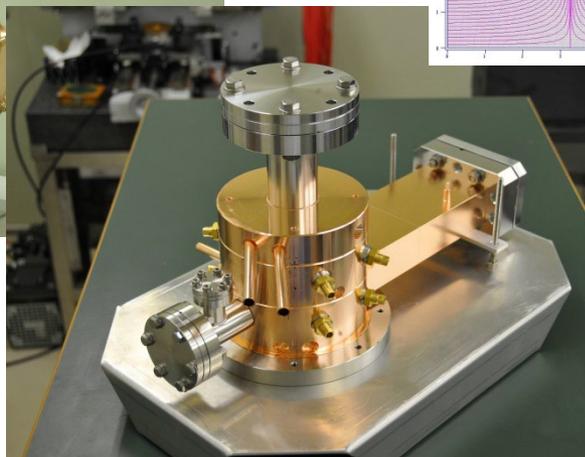
早稲田大学初号機



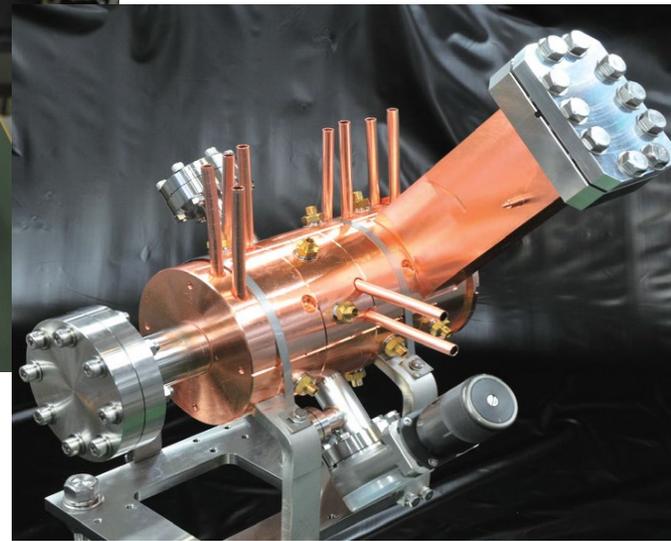
3.6 Cell RF gun (KEK)



早稲田大学2号機

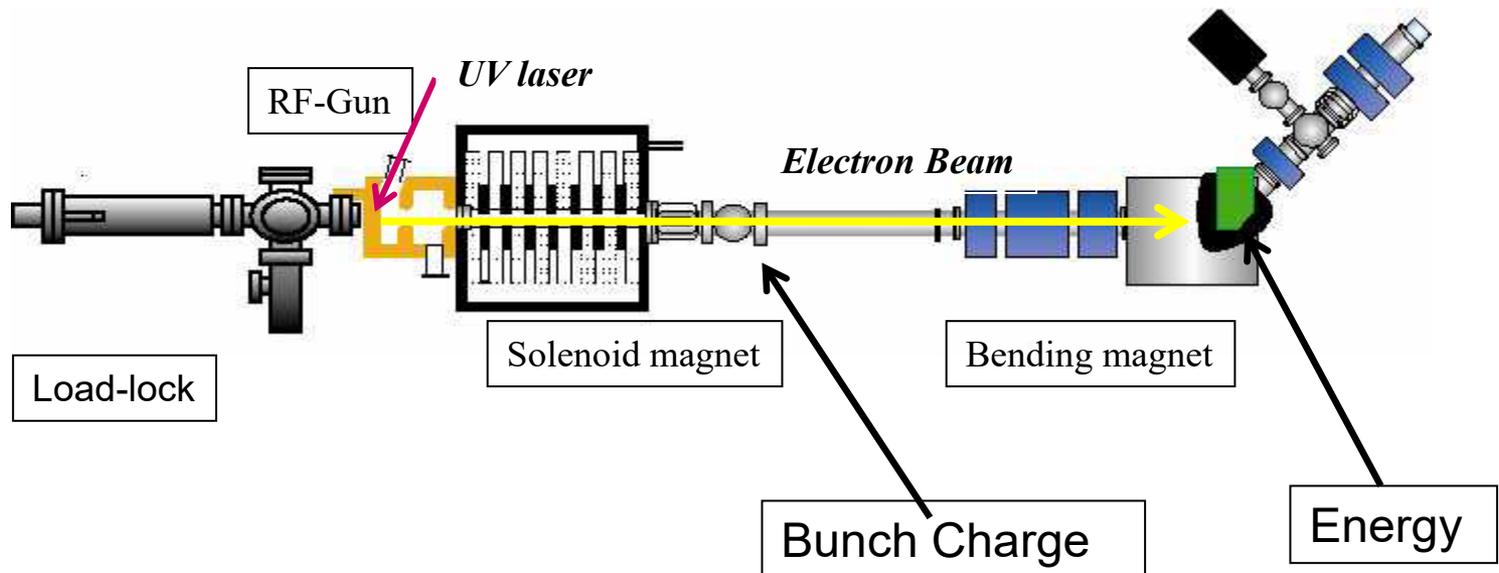


Mode Separated RF gun (KEK)



Beam Test Facility

Beam Line Layout at Waseda University



Beam Applications

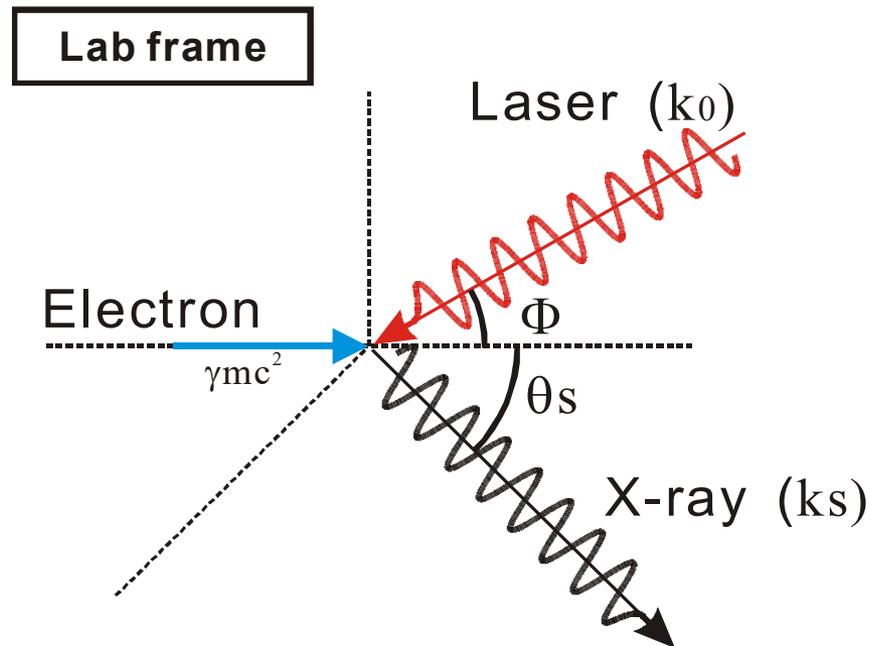
Inverse Compton Scattering

Pulse Radiolysis

(本日は時間が限られているので, Invers Compton scattering についてのみ紹介)

Inverse Compton Scattering

相対論的速度を持つ高品質電子
ビームと高輝度レーザーの衝突に
より、高輝度の準単色軟X線生成が
可能となる

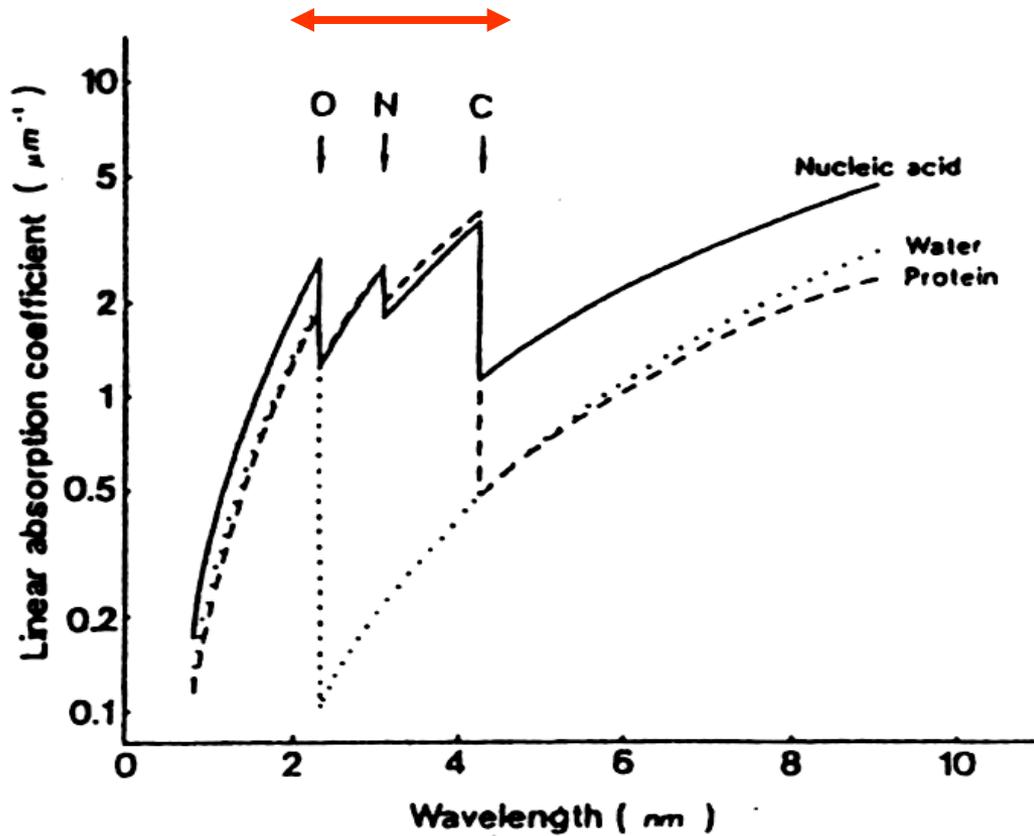


軟X線のエネルギー

$$k_s = \frac{\gamma^2 m_0 c^2 (1 + \beta \cos \phi)(1 - \beta^2) k_0}{m_0 c^2 (1 - \beta \cos \theta_s) + (1 - \beta)(1 + \cos \theta_s)(1 + \beta \cos \phi) \gamma k_0}$$

Inverse Compton Scattering

Importance of soft-X ray generation at Water Window



2.3~6.2nm (200~500eV)

K Edge Absorption for C, N, O



Water is almost transparent at this Energy Range



Living DNA measurement is available



Soft X-Ray Microscope !



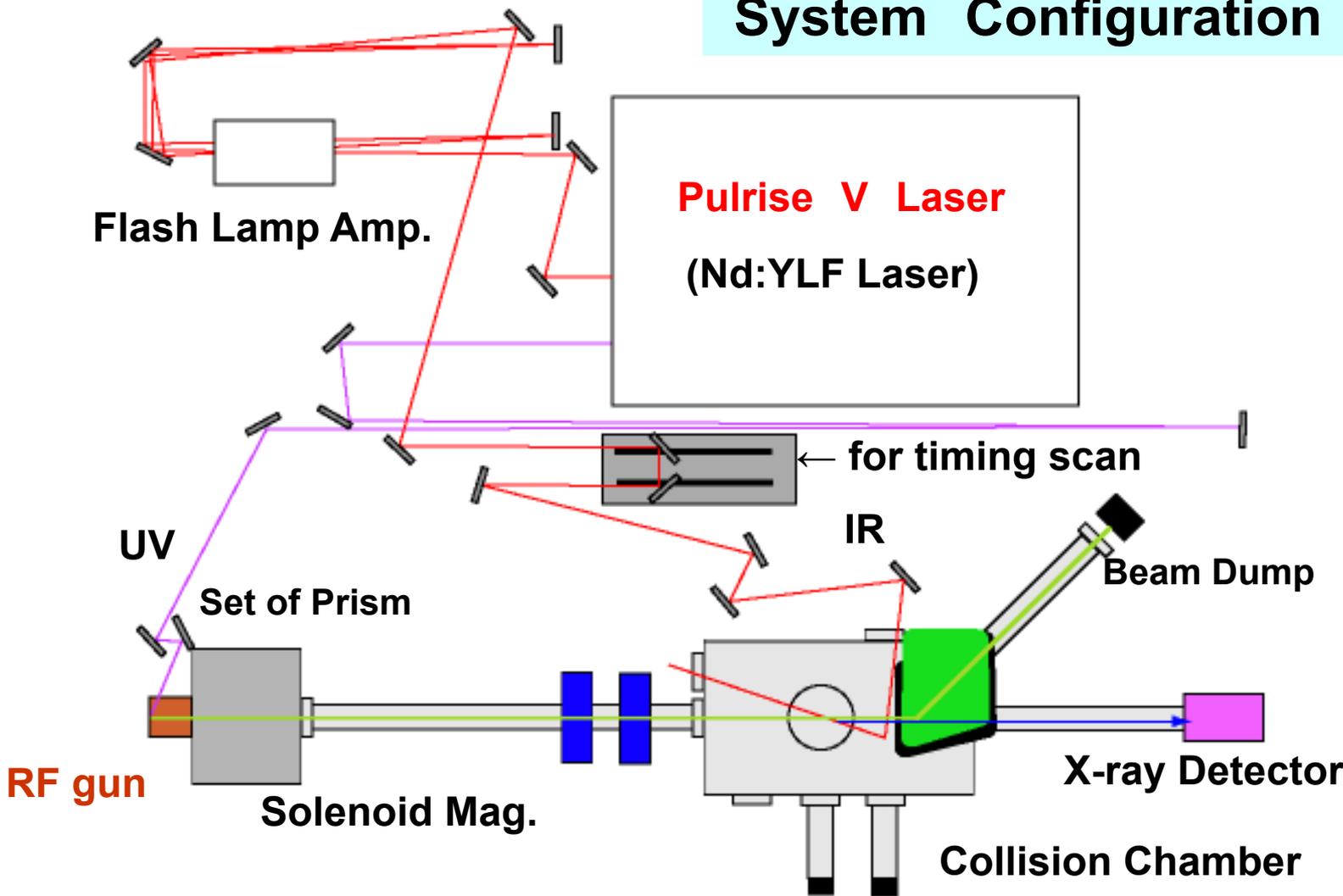
Inverse Compton Scattering

Table parameters at the collision point.

IR laser parameters (Nd:YLF)		Electron beam parameters	
Wavelength	1047 nm	Beam energy	4.6 MeV
Energy	36 mJ/pulse	Bunch charge	350 pC
Beam size σ_x	42 μm	Beam size σ_x	250 μm
Beam size σ_y	42 μm	Beam size σ_y	56 μm
Pulse width	10 ps (FWHM)	Bunch length	10 ps (FWHM)
Repetition rate	5 Hz	repetition rate	5 Hz

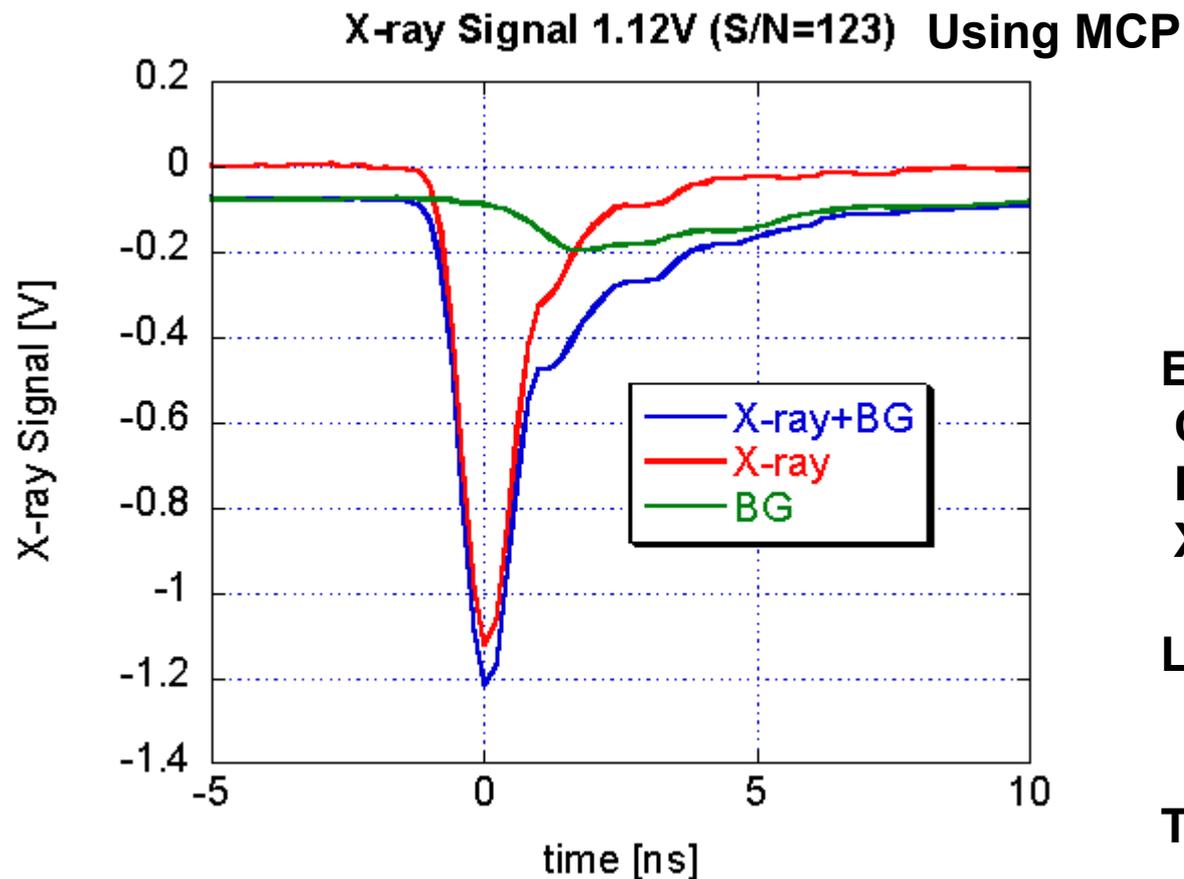
Inverse Compton Scattering

System Configuration



Inverse Compton Scattering

X-ray Signal (Results by Old Gun)



Hamamatsu F-4655

Electron:

Charge 350 pC

Energy 4.6 MeV

X-ray Energy: Ca. 300eV

Laser Power

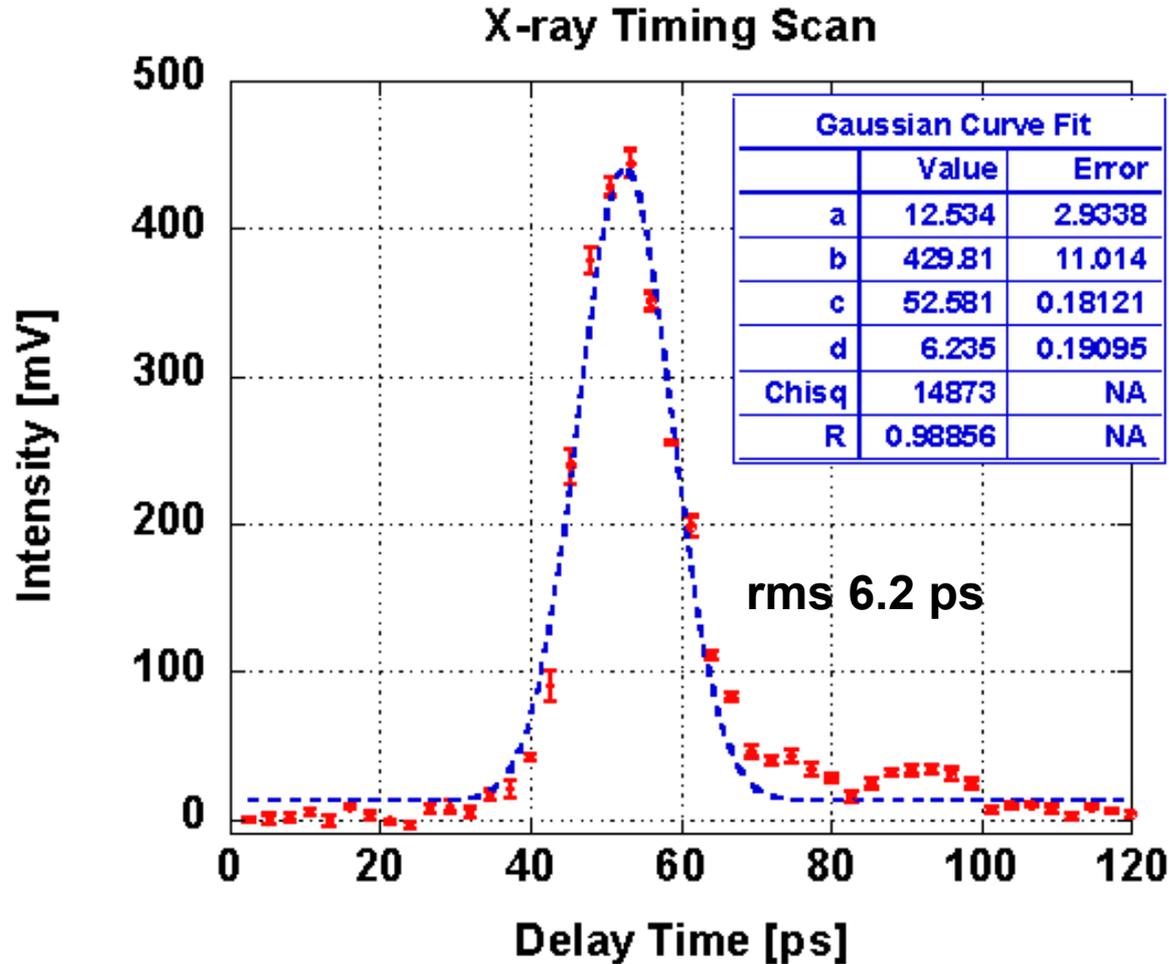
: 36 mJ

Total Photon (X-ray)

: 3.2×10^4 /pulse

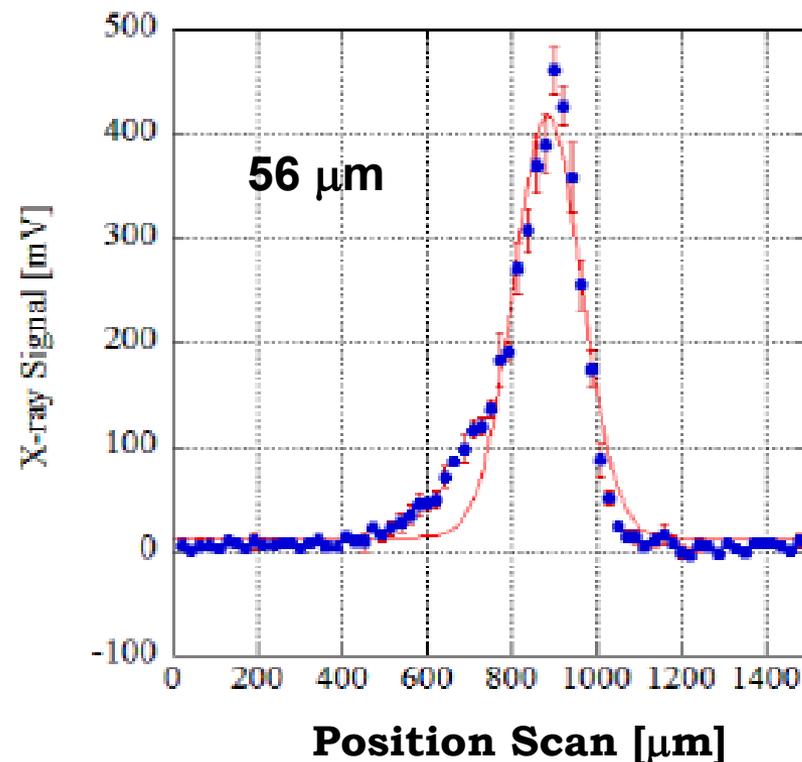
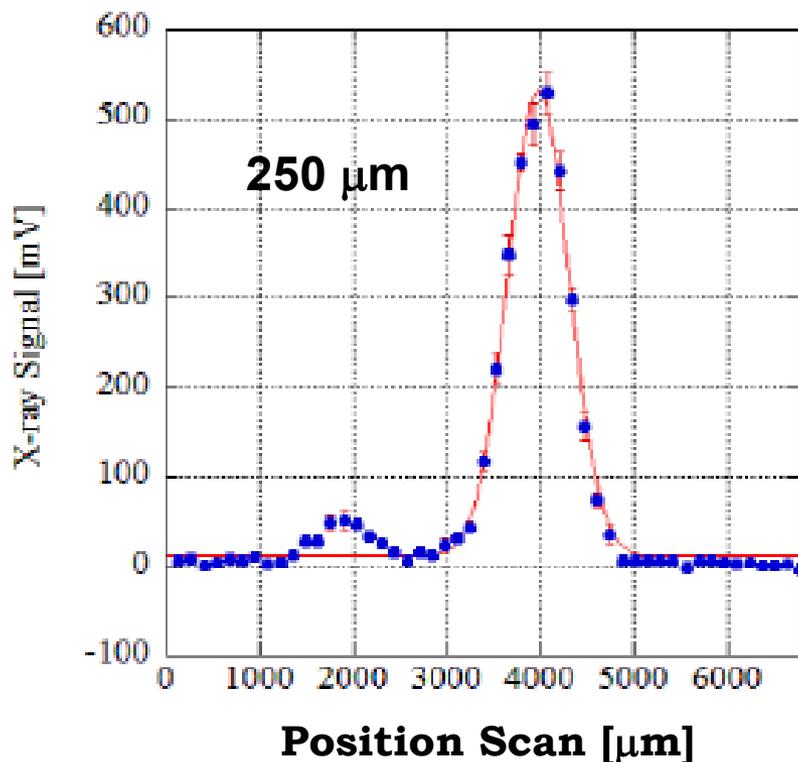
Inverse Compton Scattering

Obtained X-ray Signal (Timing Scan)



Inverse Compton Scattering

Collision Point Scanning (by Laser)

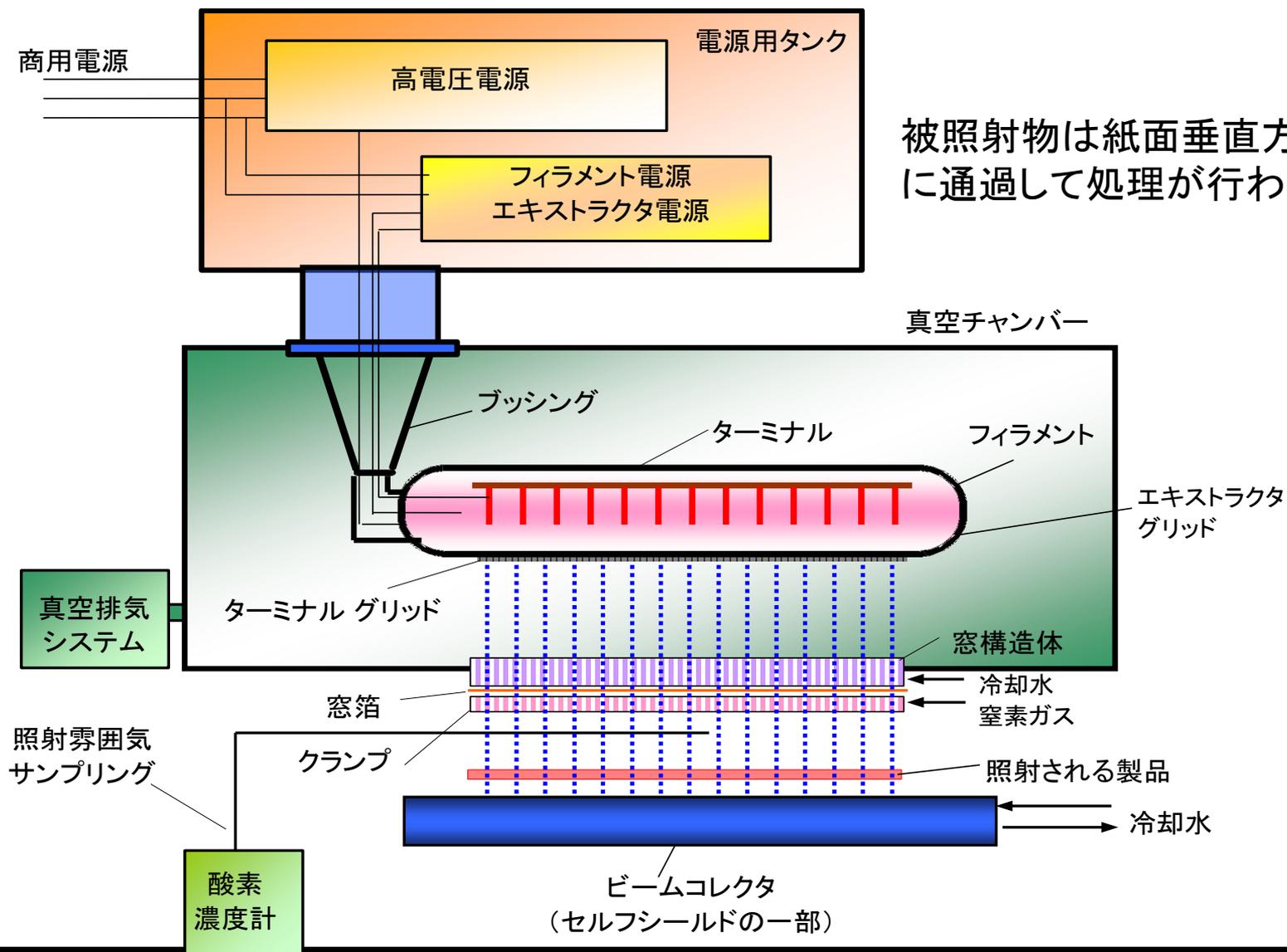


Electron Beam Size Scan Horizontal (left) and Vertical (right)

ビーム応用技術の概要

1. 電子線応用技術

商用低エネルギー電子線加速器の概観



目的	具体例
素材の性質を改善する	架橋技術
耐熱性をアップ	樹脂材料の耐熱性をあげることで、高温環境下や熱湯にさらしても変形しにくくなる。（PEなど）
強度をアップ	樹脂材料やゴムなどの機械的強度をアップ。
素材に新機能を加える	重合技術（グラフト） & 架橋技術
保水力 をプラス	樹脂材料に親水性のある物質をグラフト重合（分子レベルの接ぎ木）することで、保水力を加えることができる。（アクリル酸などを接ぎ木）
消臭 効果をプラス	樹脂材料に脱臭機能のある物質をグラフト重合することで、消臭効果をプラスすることができる。
難燃性 をプラス	合成繊維に難燃性の物質をグラフト重合することで、燃えにくい繊維にすることができる。
形状記憶 機能をプラス	電子線を照射した樹脂成型品は、非照射のものに比べて形状回復能力が向上する。（架橋技術）

樹脂を固める	重合技術
傷つき易い素材を保護	フィルム等にEB樹脂でコーティングすることによって傷が付きにくく仕上げをすることができる。
より良い材料に改善する	架橋技術
環境に優しい材料に	ラップフィルムとして安価なポリエチレンが登場している（ポリエチレンの引っ張り強度や耐熱性がEB照射により向上できるため）
より 高性能な材料 に	繊維強化・セラミックス複合材の強化繊維に用いられる炭化ケイ素に電子線を照射すれば、 摂氏1500度以上の耐熱性 が得られる。宇宙航空分野や原子力発電、核融合炉などの構造部材として利用可能
加工方法を改善する	常温反応技術
熱に弱い材料を加工	常温で処理。感熱紙のクリアコーティング等へ応用（熱くなると変色したり変形したり変質したりする材料が多いが、電子線で問題解決）

生産効率を改善する		高効率、高速反応技術
硬化処理速度を向上		樹脂の硬化の場合、紫外線や熱乾燥に比べて短時間硬化が可能（生産性の向上、ライン短縮も見込める）
重ねて加工		エネルギーにもよるが、電子線は物体透過性があるので、色のついたものでも重ねた状態で加工できる。
素材を扱いやすくする		分解反応応用
バラバラに分解する		テフロンは粉状にするのは難しいが、電子線を照射することにより分解を促進し、微粉砕を可能にする
殺菌、滅菌する		DNA損傷（直接効果、間接効果）
滅菌する		医療用器具やPETボトルに付着する雑菌やウイルス等を死滅させる ⇒ 社会実装の一例を紹介
殺菌する		包装材の殺菌にも電子線が利用可能

滅菌技術の社会実装の一例紹介 (PETボトルのインライン滅菌)

PETボトル用 EB滅菌システムの実用化

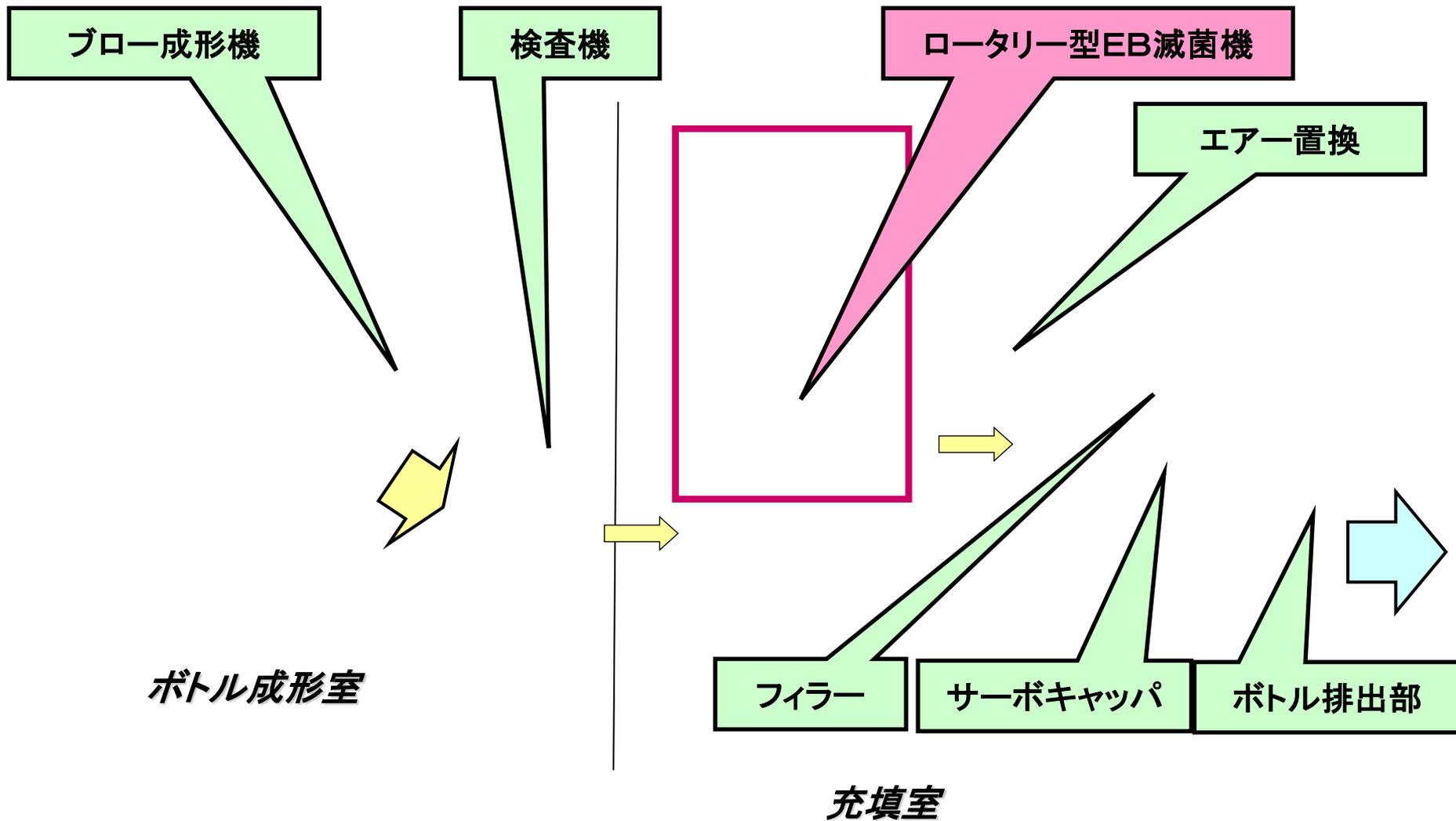


電子線加速器

世界初のPETボトル飲料用
EB滅菌方式 無菌充填システムが実用化されている。
(澁谷工業(株))

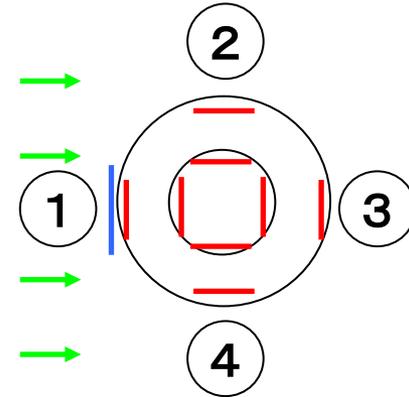


EB滅菌アセプ充填システムのレイアウト例



▶ 口部吸収線量とコールドスポット

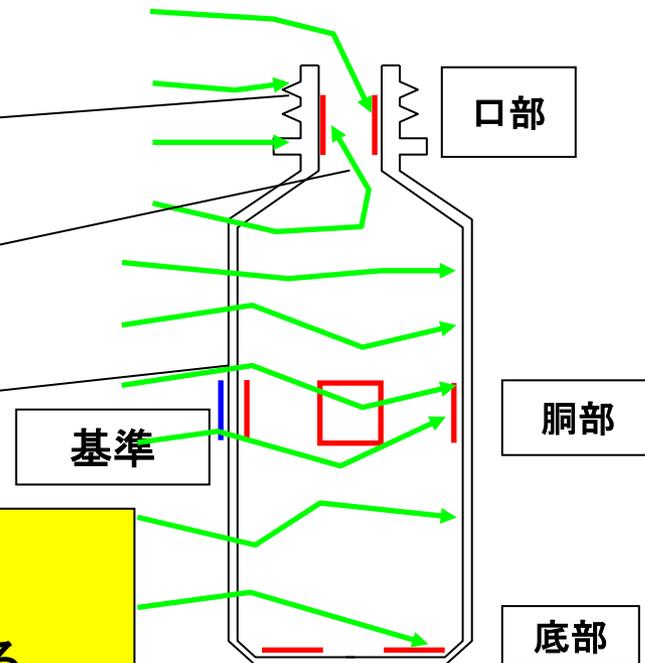
	①	②	③	④
口部内面	8.8kGy	8.8kGy	8.7kGy	9.1kGy
胴部内面	44kGy	30kGy	45kGy	30kGy
底部内面	32kGy	26kGy	32kGy	33kGy
基準位置	80kGy (胴部正面外側)			



口部は1mm程度の厚さがあるため
電子線が透過しない

口部は散乱によって回り込んだ
電子が当たる

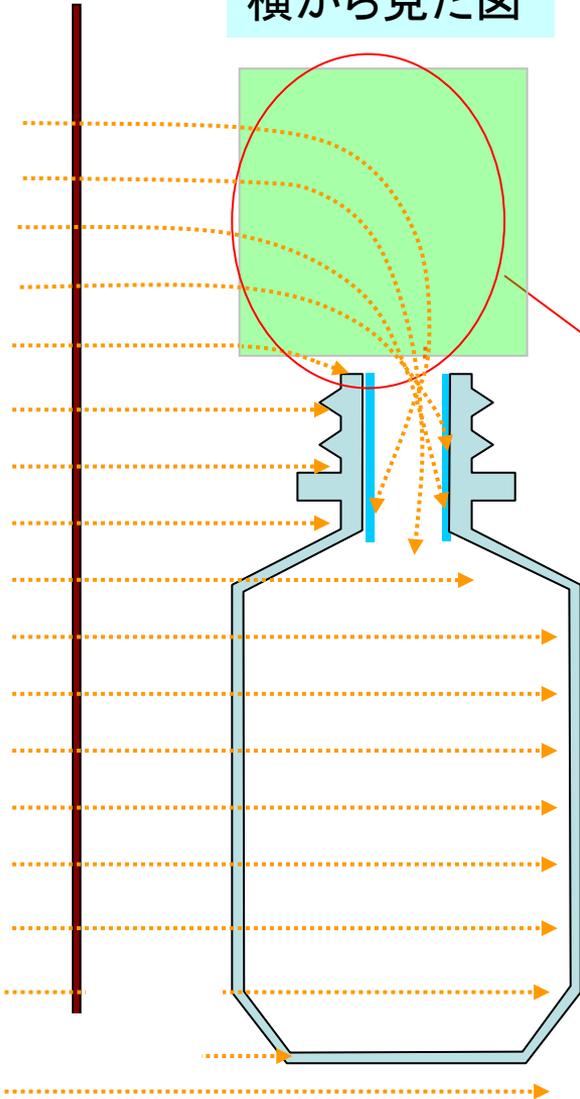
胴部0.1~0.3mm程度の厚さのため
電子線が透過する



**口部内面が吸収線量の一番低い
コールドスポットとなる。
ここもきちんと照射して滅菌する必要がある**

磁場による口部の照射効率UP

横から見た図

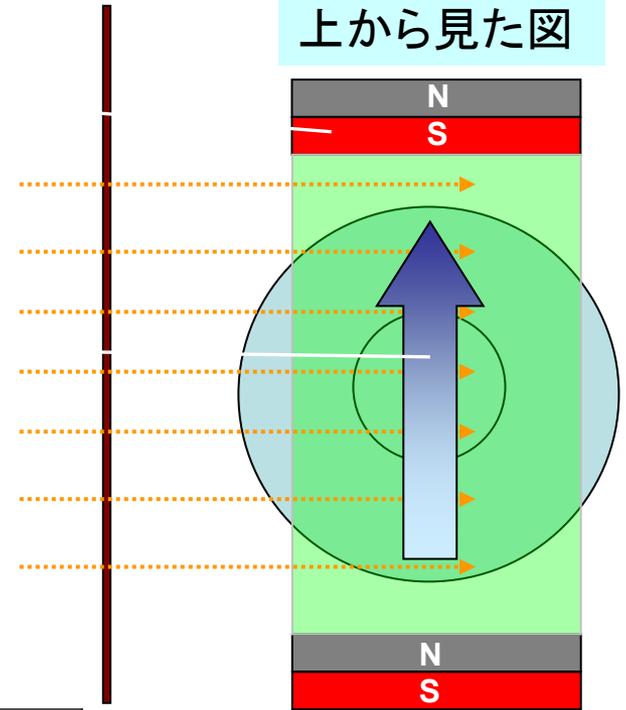


ボトル上部に磁石
を対向させ配置

磁場の向き

磁場により電子線が曲げられ、
口部内面に効率よく照射できる。

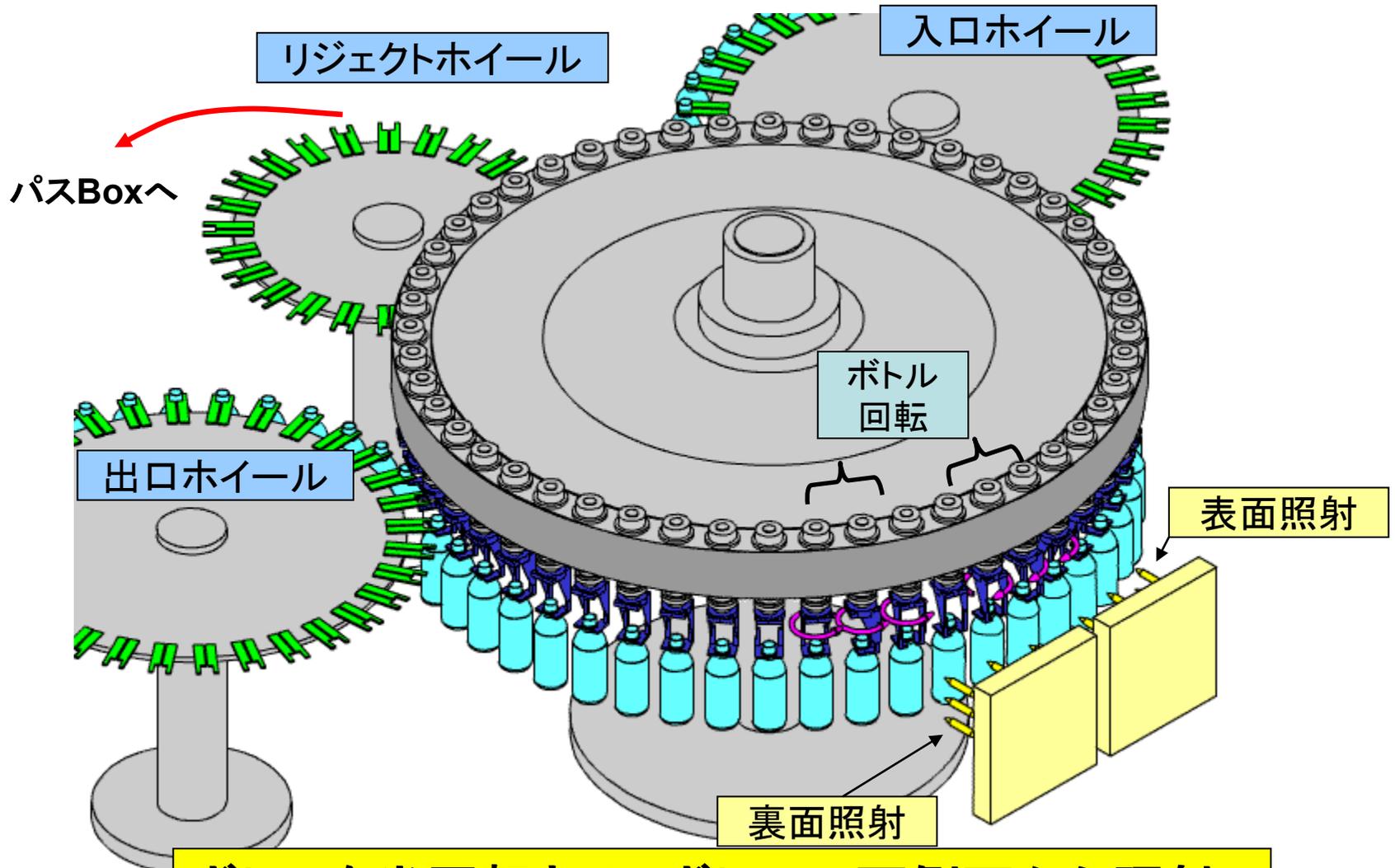
上から見た図



	磁石無	磁石有
電流(mA)	169	89
口部線量(kGy)	10.1	10.7
胴部線量(kGy)	79.5	43.5

- 容器の収縮や変形を抑制しながら、
殺菌性能の向上が図れる。
- 低い電流で口部内面線量が確保可能

EB滅菌機の動作



ボトルを半回転させ、ボトルの両側面から照射

ビーム応用技術の概要（微細加工）

2. イオンビーム応用 （EB応用も一部含む）

FIB direct etchingについて

- ・Micro- and Nano-fabrication
- ・Mask less
- ・No developing
- ・Mold作製

イオンビーム応用技術 (阪大との共同研究)

FIB equipment



FIB (Seiko Instruments SMI2050, ISIR, Osaka Univ.)

FIB parameter

Current nA	Beam size nm ϕ
1.3	100
2.9	200
5.3	300
12	2500

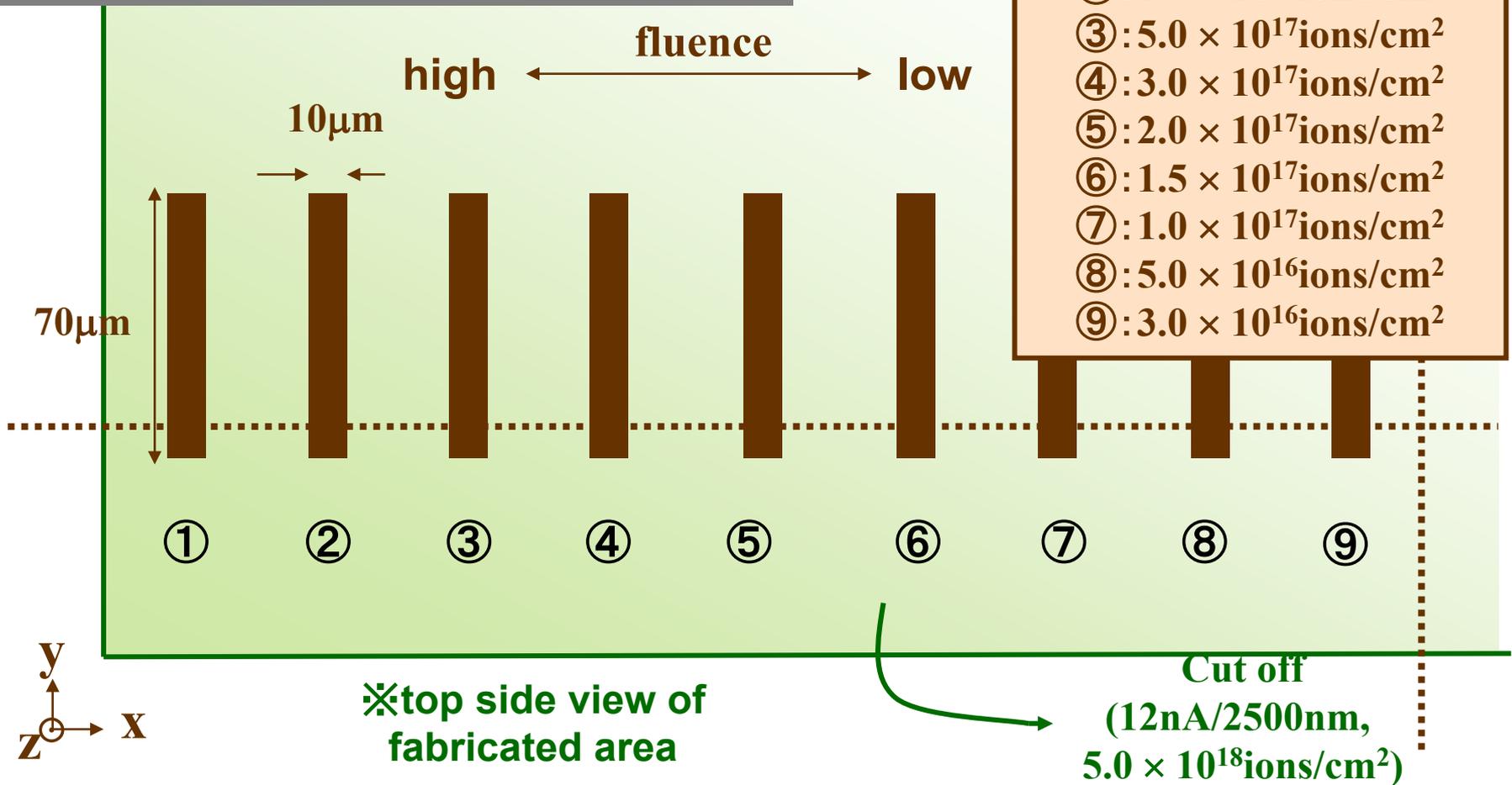
Source: Ga⁺

Voltage: 30 kV

Fluence: $1.0 \times 10^{14} \sim 2.0 \times 10^{18}$ ions/cm²

イオンビーム応用技術

Line width 10 μm & 1 μm
(架橋PTFE Sheet の加工)

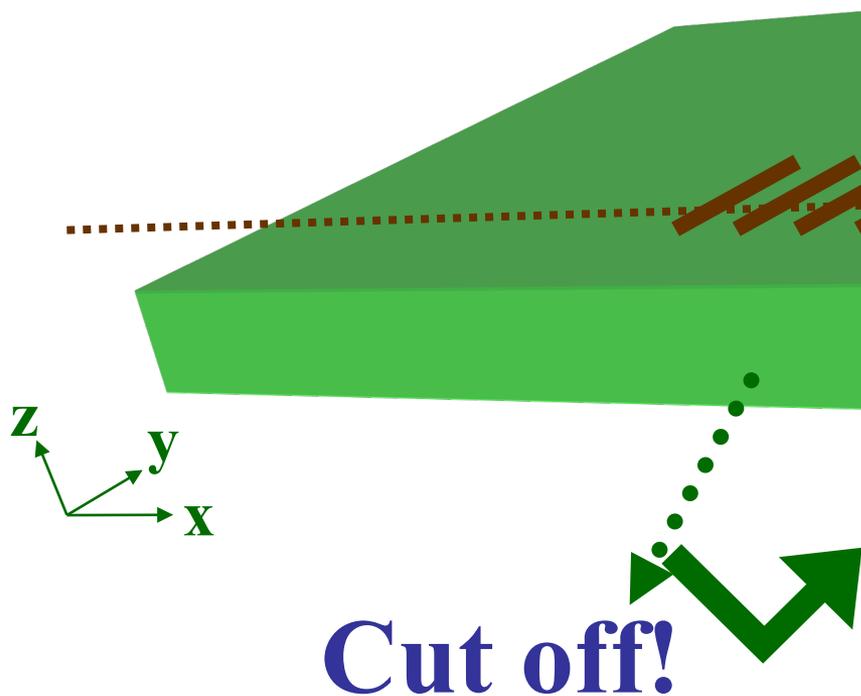


イオンビーム応用技術

① Line fabrication; $1\mu\text{m}$ & $10\mu\text{m}$

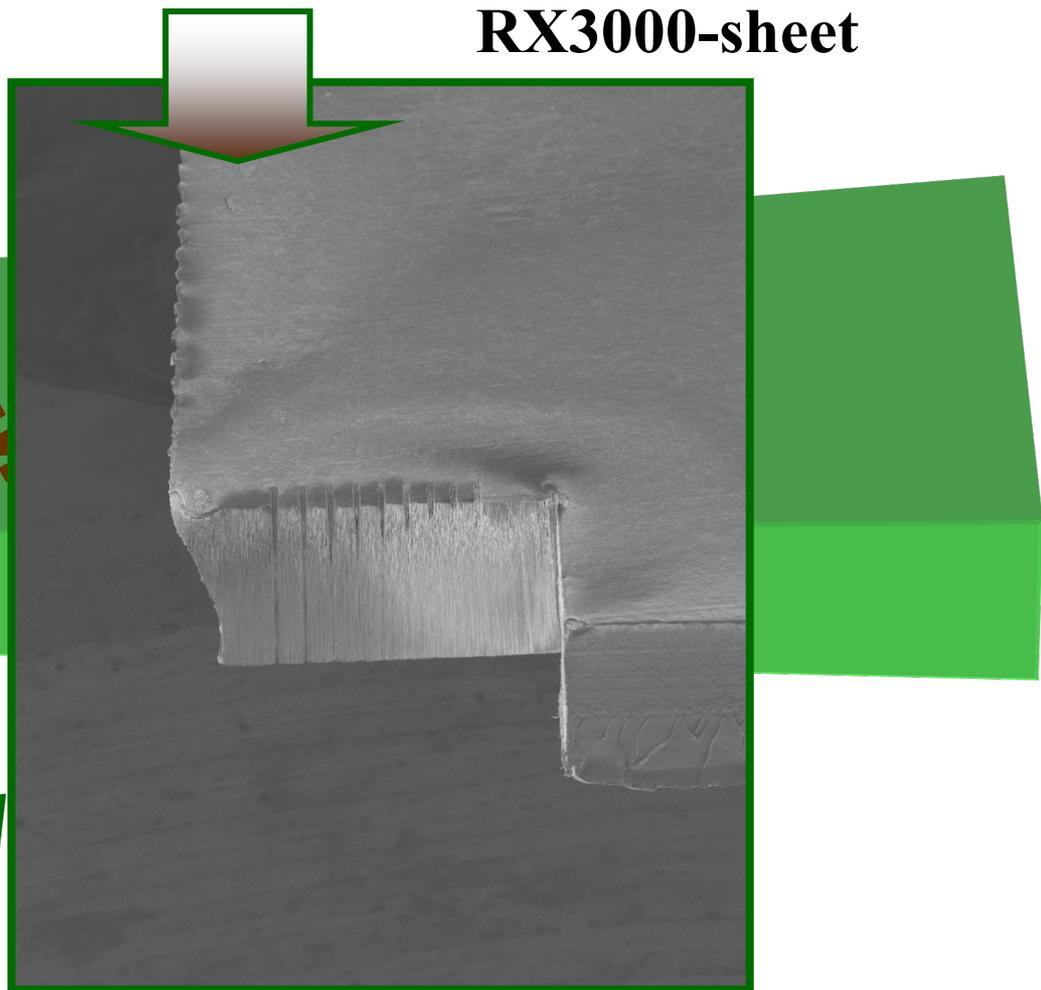
② For cross section $1\mu\text{m}$ line 1

③ For cross section $1\mu\text{m}$ line 2

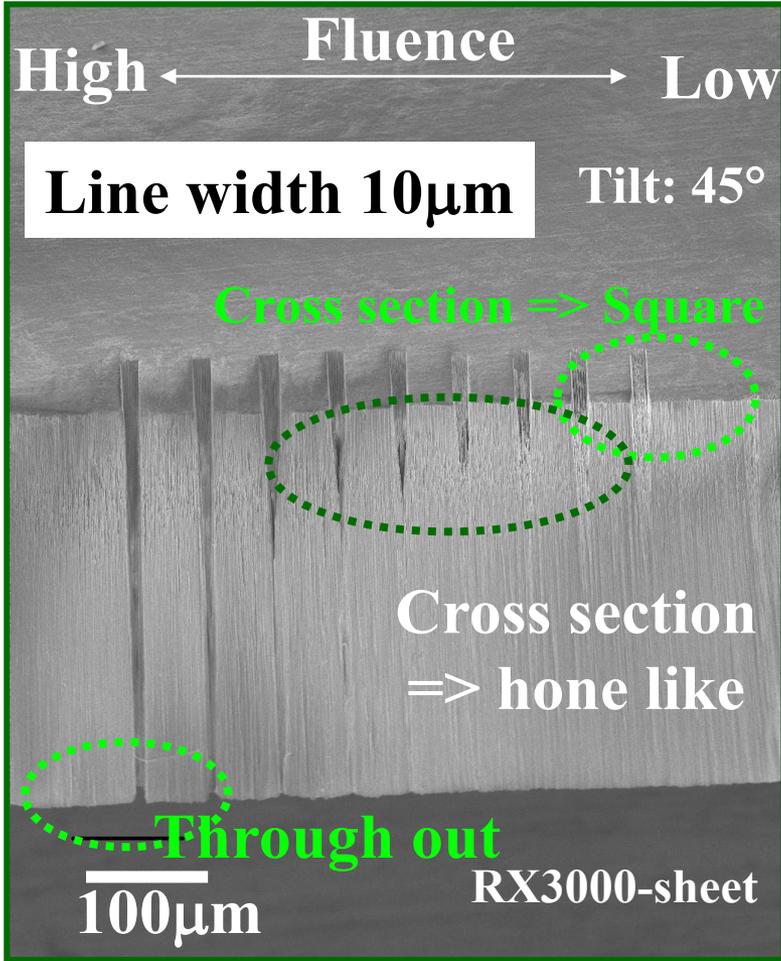


FIB

RX3000-sheet



イオンビーム応用技術

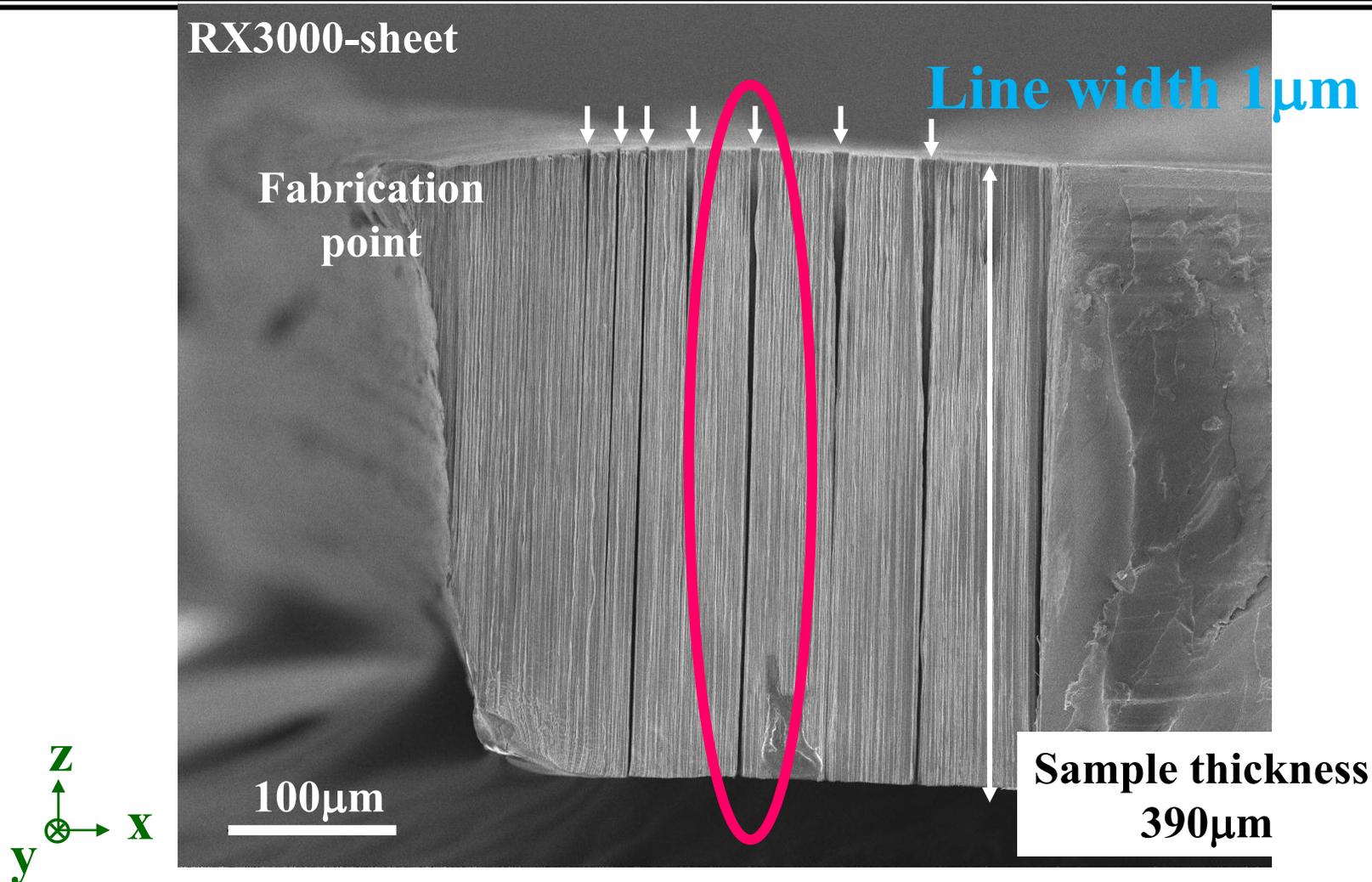


Sample thickness
 $360\mu\text{m}$

Aspect ratio
 $\Rightarrow 36$

Aspect ratio: 開口部と深さのサイズ比 ($360 \div 10$)

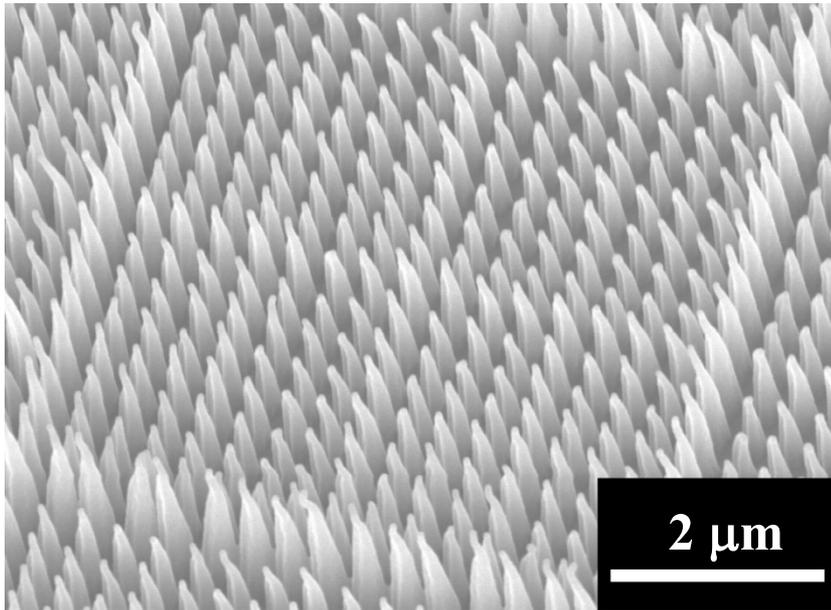
イオンビーム応用技術



Aspect ratio 390 ! !

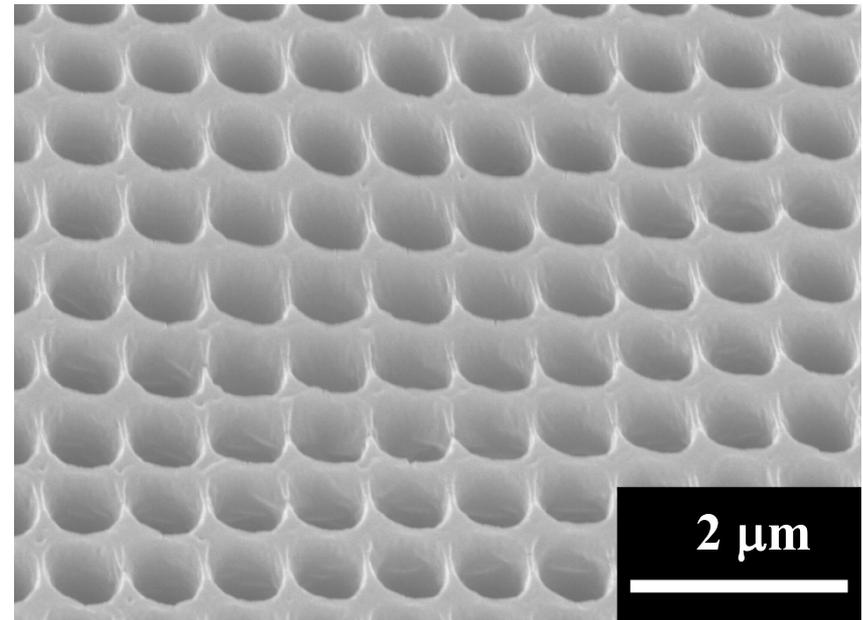
Test results for Nano-scale fabrication

Nano needle (ϕ 200nm)



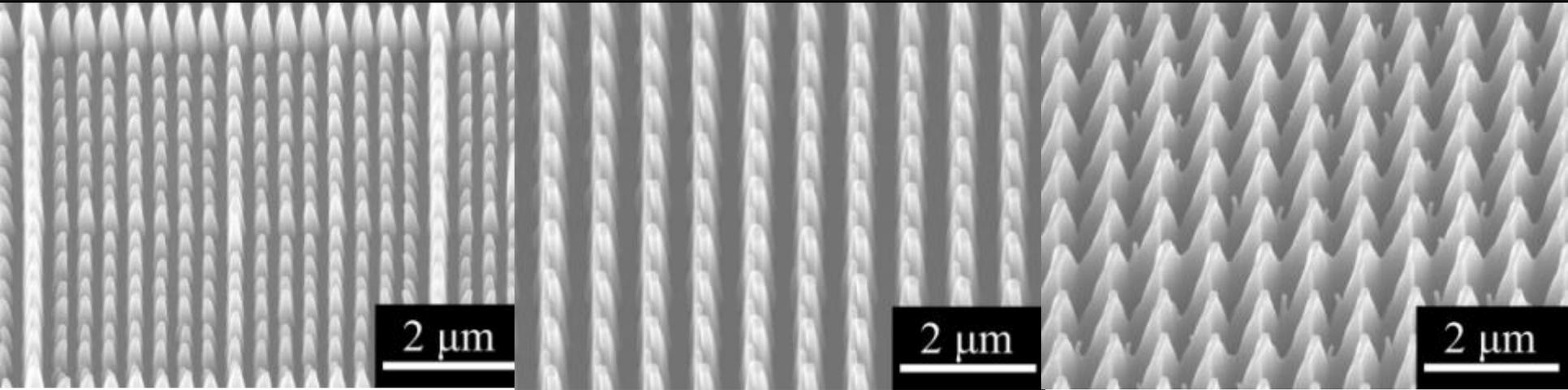
**FE-SEM image of fiber pattern
(Beam current:48 pA , beam size:23 nm
Fluence: 5.0×10^{15} ions/cm²
View scale: 1200 μ m)**

Nano porous filter (ϕ 600nm)



**FE-SEM image of filter pattern
(Beam current:48 pA , beam size:23 nm
Fluence: 1.0×10^{15} ions/cm²
View scale: 600 μ m)**

イオンビーム応用技術



2 μm

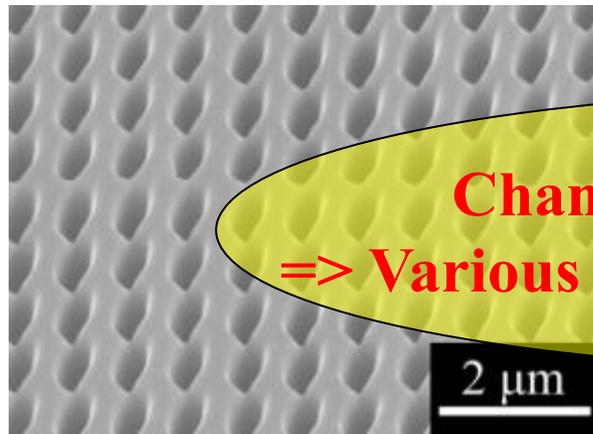
2 μm

2 μm

Spot distance: 550 nm

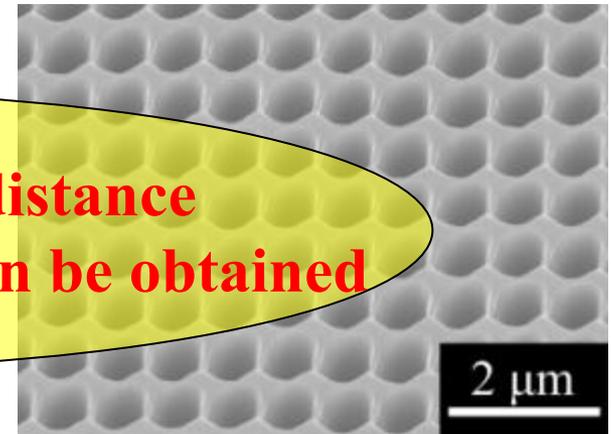
600 nm

650 nm



2 μm

700 nm



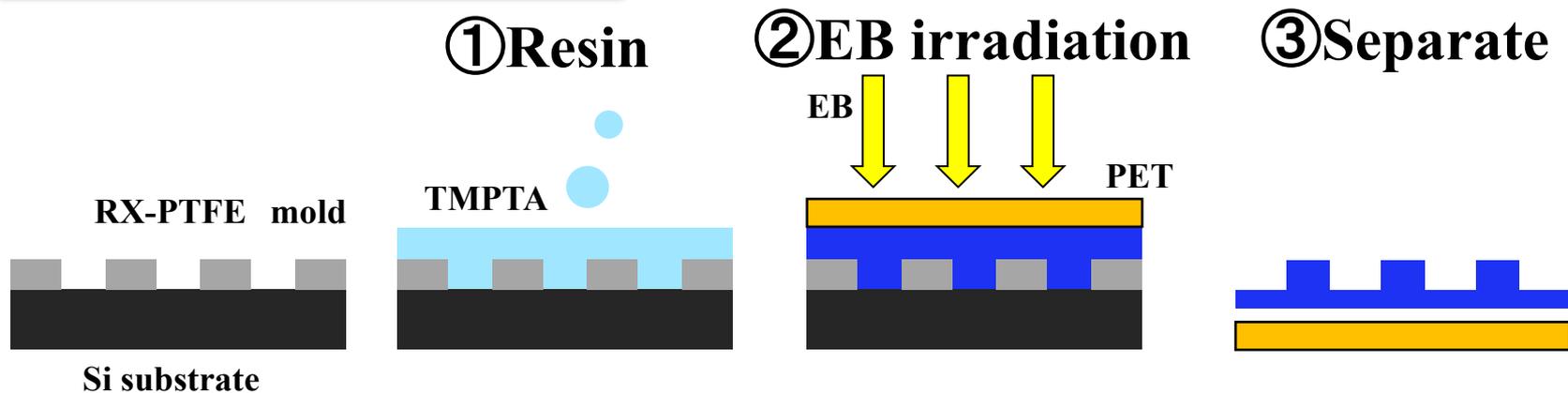
2 μm

750 nm

**Change the beam spot distance
=> Various nano structures can be obtained**

EB nanoimprint

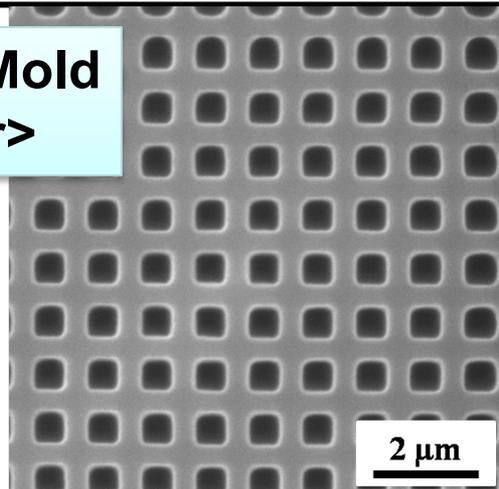
Experimental procedure



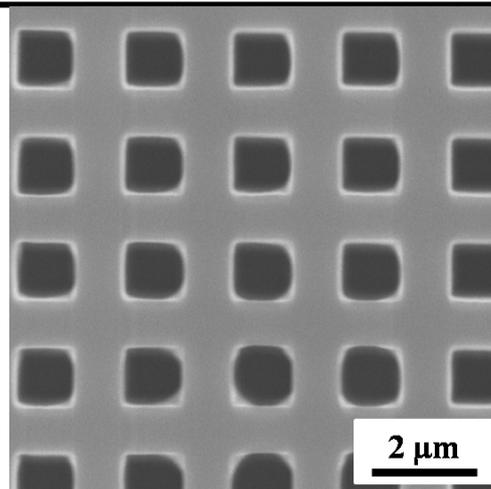
TMPTA: Trimethylolpropane Tri-acrylate 電子線照射で瞬時に高分子化

イオンビーム・EB応用技術

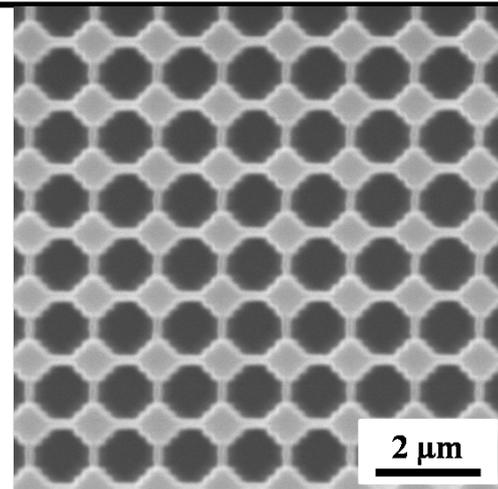
RX-PTFE Mold
<Mother>



610 ± 8 nm square

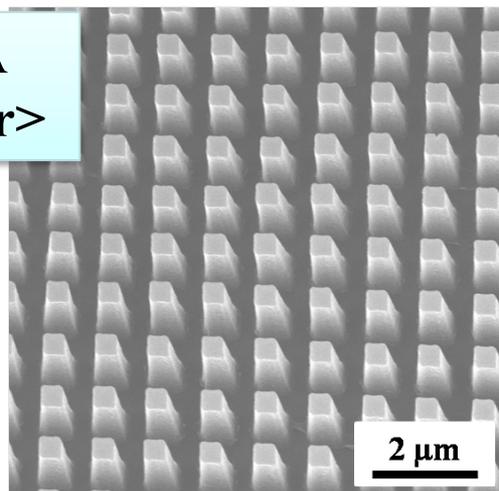


1.1 ± 0.1 μm square

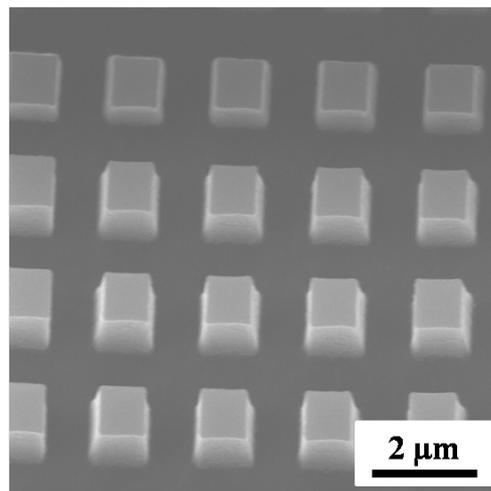


$\phi 728 \pm 6$ nm circle

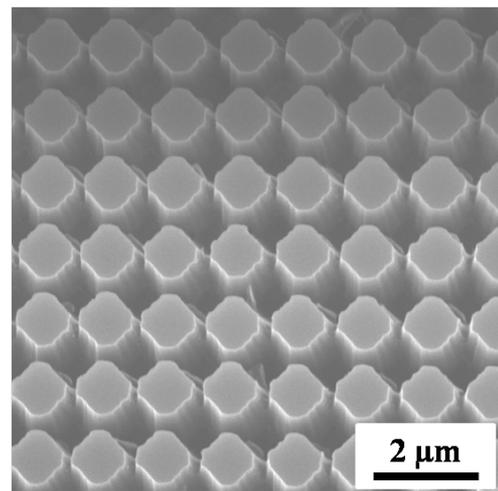
TMPTA
<Daughter>



417 ± 6 nm square



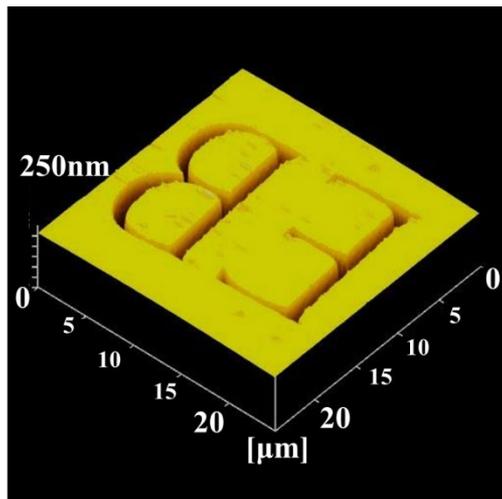
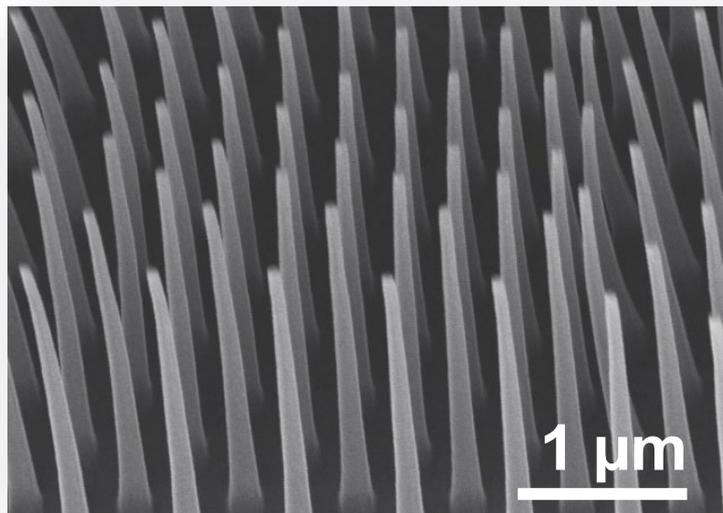
880 ± 12 μm square



$\phi 693 \pm 11$ nm circle

ナノインプリントによる微細構造の例

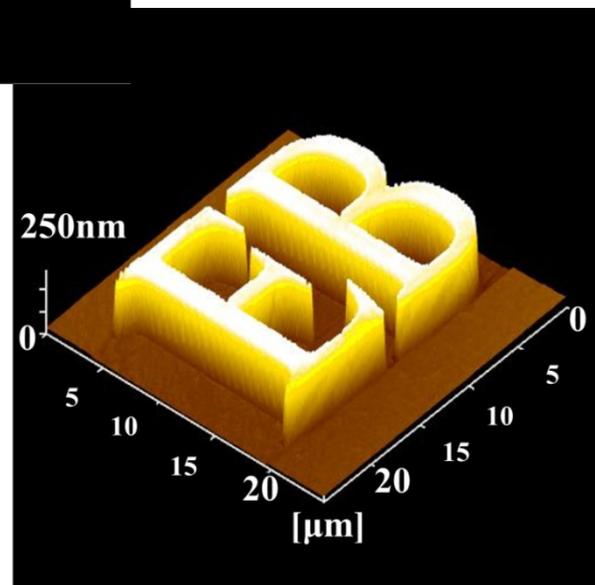
加速器ビームを使ったナノ・マイクロ構造体開発



プリントの型(Siモールド)

EBナノインプリントによる微細構造体創製

EB ナノインプリントによるRX-PTFE
マイクロ任意形状構造体の創製(AFM像)



先端加速器開発

- ・RFガンの開発⇒ 順調に成果を挙げてきた
- ・RFガンの応用研究
 - 逆コンプトン散乱によるX線生成に成功
 - パルスラジオリシスへの展開も行えた

ビーム応用技術開発

- 電子線滅菌によるPETボトルのインライン滅菌実用化
- FIBを用いたナノスケール加工体の作製
- FIBとEBを用いたナノスケール転写体の作製

加速器・放射線応用技術のこれからの展望

1. 歴史を振り返ると

過去から、ずーっと順風で走ってきたものは？・・・

ポリエチレンの架橋体創製

自動車タイヤ用ゴムの「はしかけ」も・・・

なぜ生き残った？

⇒ プロセスが簡単、他の方法ではコスト・品質が達成できなかった
ライフサイクル(使い終わったあとの処理など)が従来技術と変わらない

なくなってしまった、あるいはほとんど使われなくなった応用

フロッピーディスク製造(フロッピー自身がなくなった)

トンネル内装鋼板(日本中のトンネルにいきわたってしまった)

転写印刷技術(印刷技術がすごく発展して使う必要がなくなった)

王子製紙のスーパーミラー(使用後の処理に問題)

等

放射線応用技術のこれからの展望(2)

2. 生き残っている技術、生き残れる技術
社会インフラの底辺を支えているもの
他に代わる技術がコスト高あるいは性能が劣るもの

3. こんな応用なら生き残る？
放射線を使うだけでほぼできる
(発泡ポリエチレンやはしかけフィルム)

放射線がなければできない ⇒ 分析、医療等

作ったものが長く使われる(半導体など)

環境負荷の小さな技術(化学物質や水を使わない等)
⇔PETボトル製造ライン

日本の巨大科学技術

J-PARCプロジェクト

JAEA & KEK プロトン+中性子科学

RIビームファクトリー

理研 不安定核、新元素

X-FEL

理研播磨 超短パルスX線

Super KEKB

KEK 電子・陽電子衝突 標準理論を越えて

来るべきILC

日本国 & 世界各国 超伝導技術、材料技術
真空技術、大電力技術
国際的研究センターほか

放射線応用技術が発展した陰には、最先端科学での多彩な加速器の誕生が大きな意味を持っていた。

加速器が誕生したその時(1930年代)は、 加速器はただ核物理の実験装置！

新しい放射線応用技術は、実は最先端科学の中から生まれてくるものと考えられる！！

お礼

ご清聴ありがとうございました

2024年3月23日 鷺尾方一

