

50 kWクラシカルマイクロトロン の開発と産業利用

Development of 50 kW output microtron for industrial application

長谷川大祐、山田廣成

D. Hasegawa, H. Yamada

(株)光子発生技術研究所

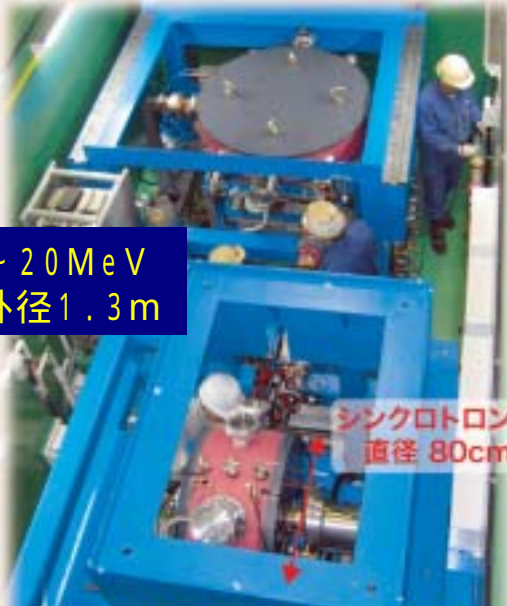
Photon Production Lab. co.



みらくるシリーズ 入射器はマイクロトロン

2006年稼動

~ 20 MeV
外径 1.3 m



シンクロトロン
直径 80cm

MIRRORCL 20SX

単色X線 (8~30keV)、軟X線、EUV
遠赤外線、硬X線 (10~20000keV)

X線分析利用
EUVリソグラフ

2003年稼動

6 ~ 10 MeV
外径 65 cm



直径 60cm

遠赤外線
(テラヘルツ光)
による分析利用

MIRRORCLE 6X (6FIR)

EUV、遠赤外線、
硬X線 (10~6000 keV)

2008年開発完了



35cm

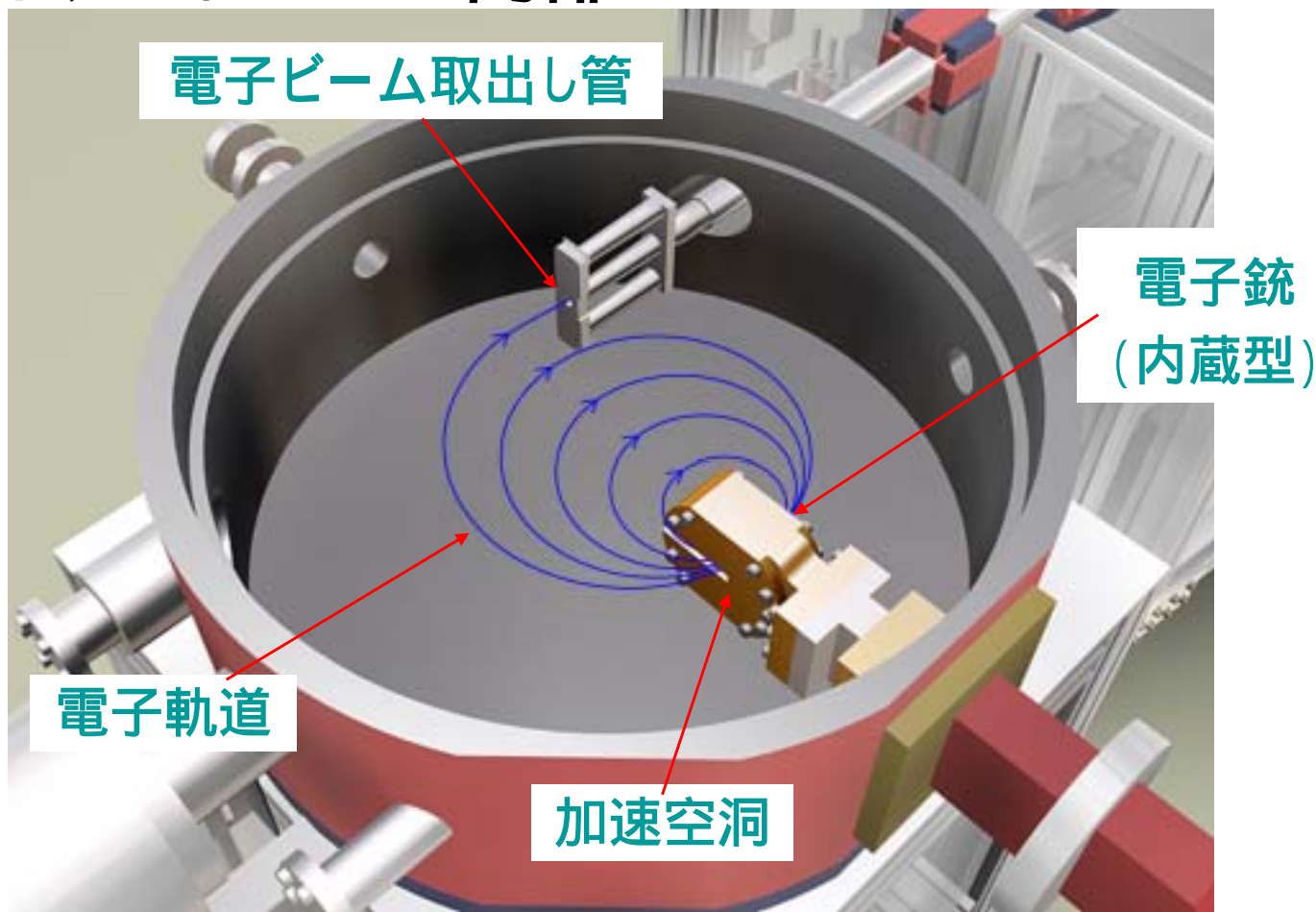
MIRRORCLE CV4

遠赤外線、
硬X線 (10~4000 keV)

X線イメージング利用

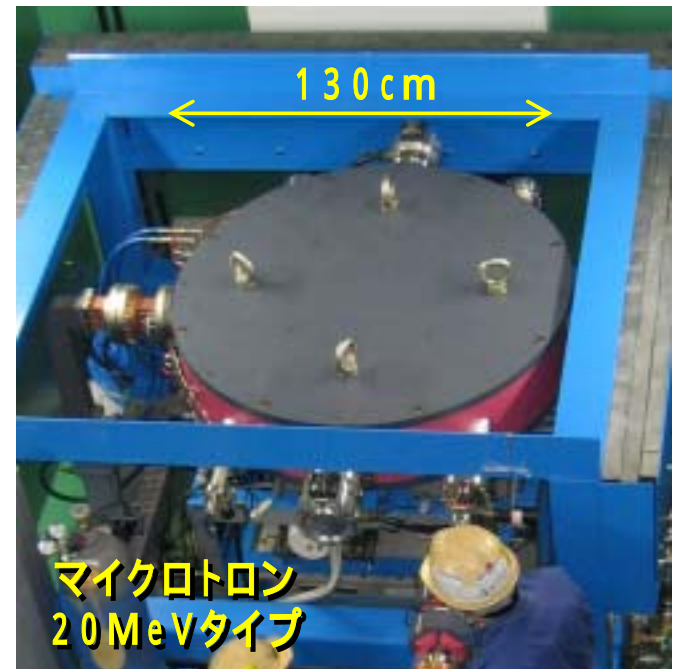
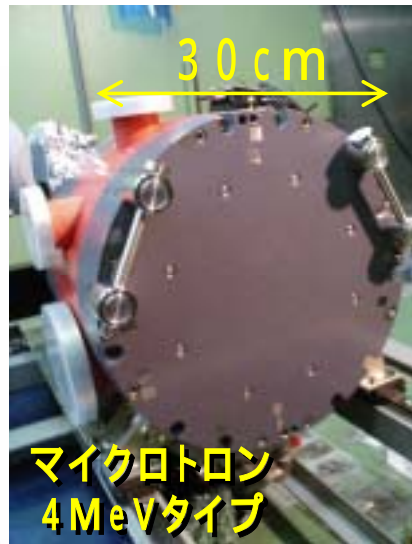
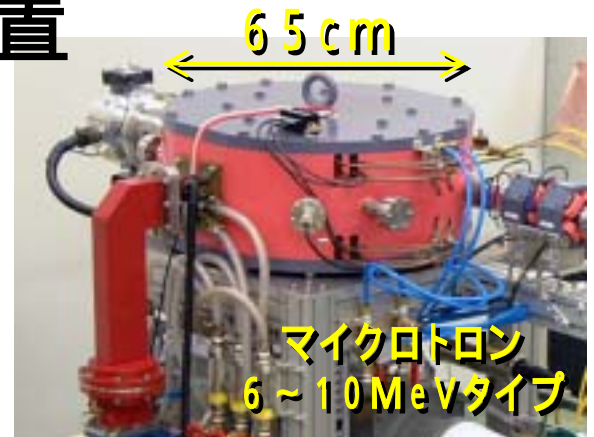
1 ~ 4 MeV
外径 30 cm

マイクロトロン内部



電子は一様磁場中を周回し、加速空洞で加速、所定のエネルギーに達すると取り出される。

高品質電子ビーム発生装置 マイクロトロン



マイクロトロンの周回条件

各ターンでの電子の周回周期を加速高周波の周期の整数倍にする。

$$T_n = 2\pi m_n / eB_0, \quad T_n = nT_{\text{rf}}$$

$$2\pi m_n / eB_0 = nT_{\text{rf}}$$

ここで、 T_n : n ターン目の電子の周期

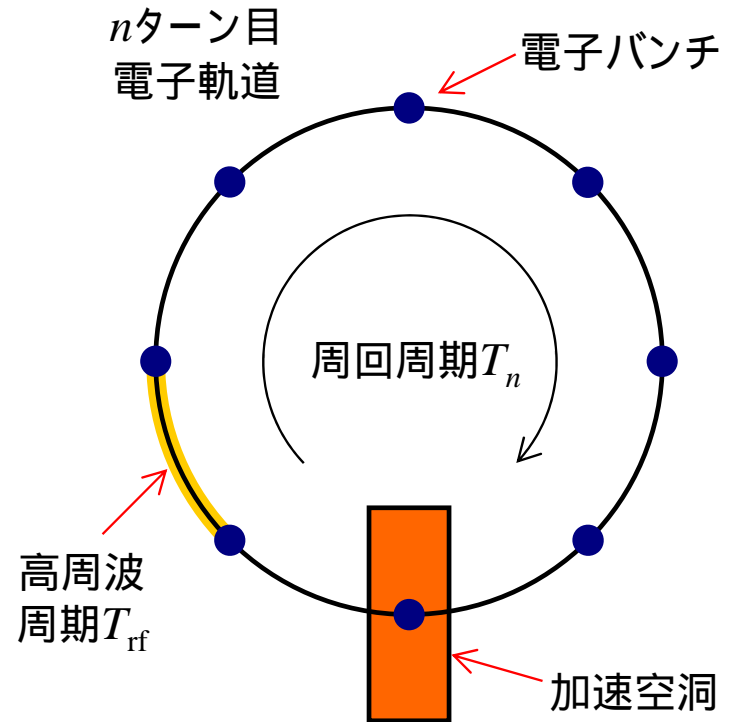
T_{rf} : 加速高周波の周期

m_n : n ターン目の電子の質量

B_0 : 主磁場(一定)

$$m_n = n\Delta m \quad (\Delta m = \Delta E / c^2)$$

$$T_{\text{rf}} = 2\pi \Delta m / eB_0$$



実際には、単一空洞を用いるため1回に加速できるエネルギーは0.511 MeV(電子の静止エネルギー)またはその2倍の1 MeV。

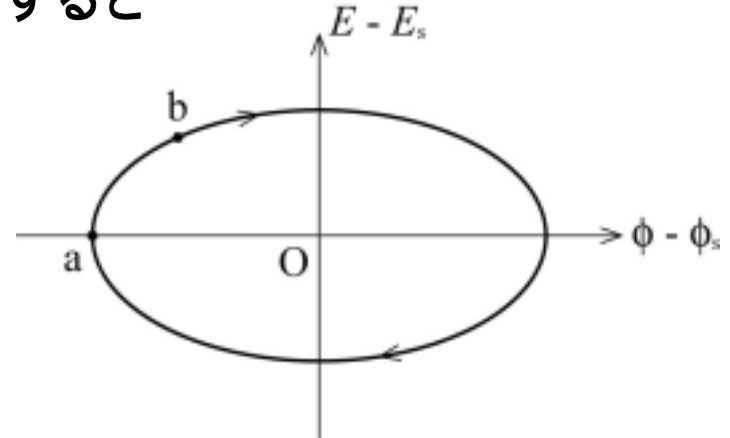
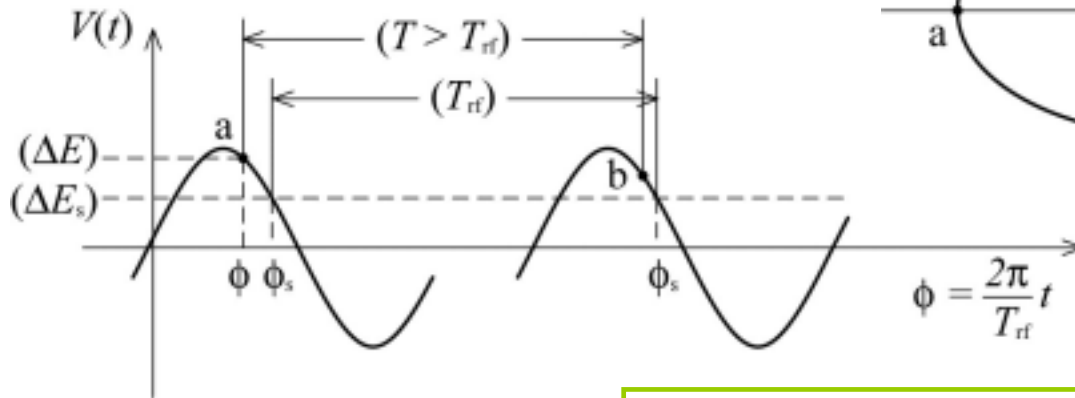
エネルギー選別機能

電子は磁場中を周回し、加速空洞を通過する毎に

$$\Delta E = eV \sin\phi \quad \text{で加速。}$$

ϕ は高周波の位相。同期位相を ϕ_s とすると

$$\Delta E_s = eV \sin\phi_s \quad \text{となる。}$$



同期位相から外れた電子も同期電子のエネルギーからかけ離れず加速される。

電子銃の電子引き出しの条件

電子銃のカソードは単結晶 LaB_6 , 直径 3 mm, 長さ 5 mm,

$$\varepsilon_{n, RMS} = r/2(kT/mc^2)^{1/2} \quad \text{から}$$

$$T = 1800 \text{ K}, \quad \varepsilon_{n, RMS} = 0.41 \text{ } \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$$

熱電子の放出電流密度Richardson-Dushmanの式

$$j_{th} = AT^2 \exp(-\phi / kT) \quad \text{から}$$

$$\phi = 2.6 \text{ eV}, \quad j_{th} = 15.3 \text{ A/cm}^2, \quad I_e = 1.1 \text{ A}, \quad (A = 120)$$

空間電荷制限電流密度Child-Langmuirの式

$$j_{sc} = 2.33 \times 10^{-6} (V^{3/2}/d^2) \quad \text{から}$$

$$d = 2.5 \text{ cm}, \quad j_{th} = 15.3 \text{ A/cm}^2, \quad V = 120 \text{ kV}$$

$$V = 1 \text{ MV}, \quad j_{sc} = 373 \text{ A/cm}^2$$

実際には、

$$E = 1 \text{ MeV}$$

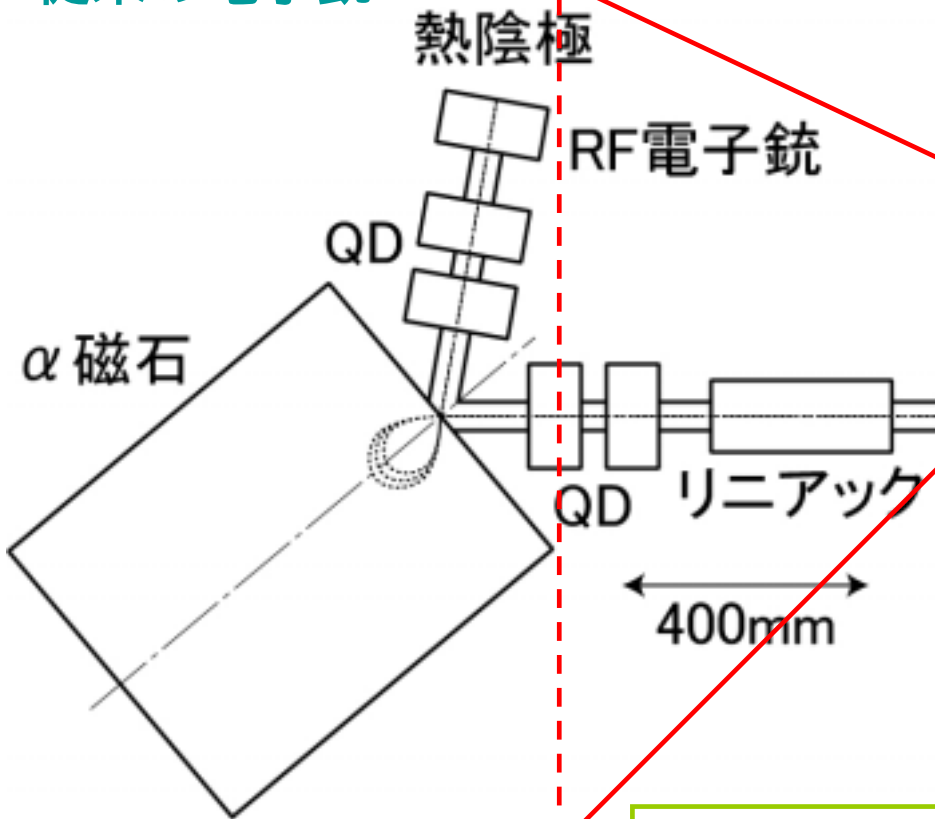
十分な集束力と

→ 引き出し電流

低エミッタンス

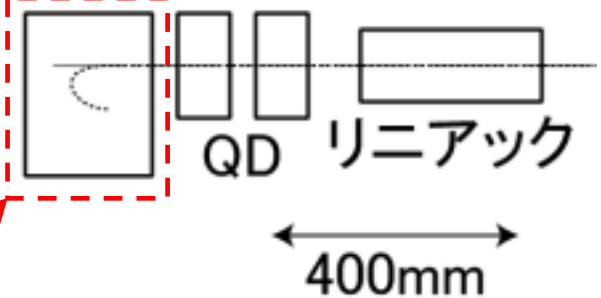
従来の電子銃との構成の比較

従来の電子銃



1MeVマイクロトン型電子銃

電子銃



ハイブリッド加速器マイクロトンの方がはるかに小型で簡素、低廉化が可能。

マイクロトロンの特長

● 加速空洞に電子銃を内蔵

→ 1 MVで電子を引き出す → 高輝度

● 磁場で周回しながら加速

→ ハイブリッドな加速器 → 小型化

プリバンチャ・加速管・ 磁石をひとまとめ

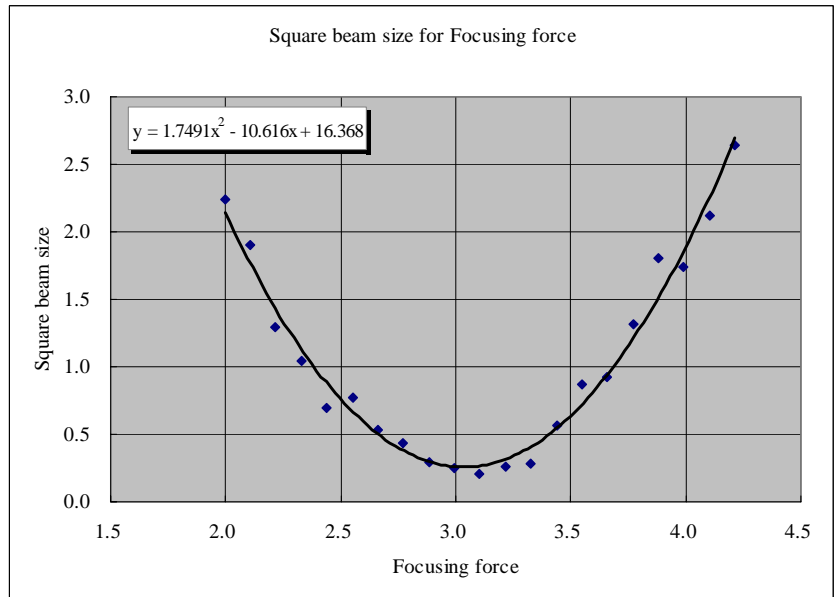
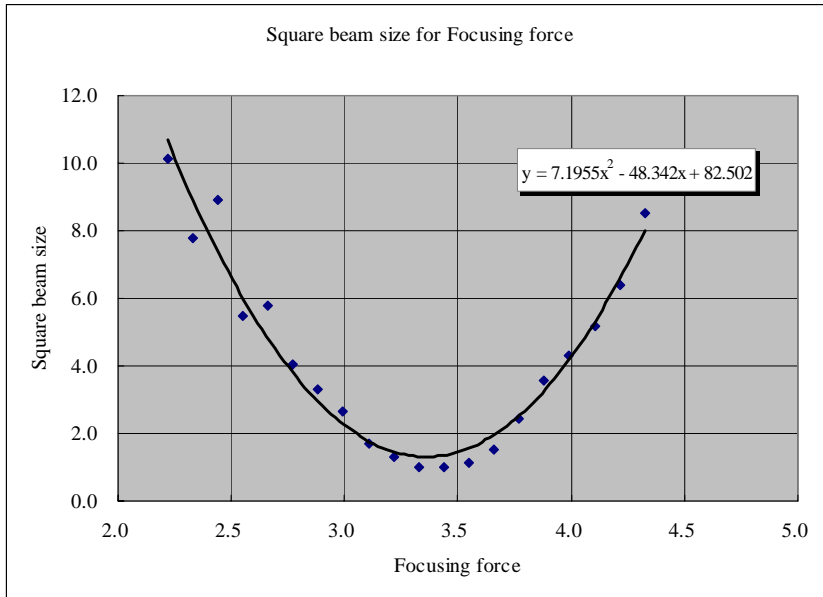
1 MeVの電流は500 mA

4 MeVで150 mAに減衰、20 MeVで150 mA

エネルギー分散は1%以下

エミッタンス測定結果

(四極磁石掃引法)、6 MeVマイクロトン、100 mA、20 Hz



横方向:

$$a = 7.196$$

$$a' = 7.196$$

$$b = -48.34$$

$$b' = 3.359$$

$$c = 82.50$$

$$c' = 82.50$$

$$\varepsilon_y = 29.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

縦方向:

$$a = 1.7491$$

$$a' = 1.749$$

$$b = -10.616$$

$$b' = 3.035$$

$$c = 16.37$$

$$c' = 0.260$$

$$\varepsilon_y = 6.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

産業・医療分野への利用

● 重構造物の高精度X線非破壊検査装置

➡ 高エネルギー・低エネルギー分散

焦点サイズ1mm以下

● ハイブリッド電子銃

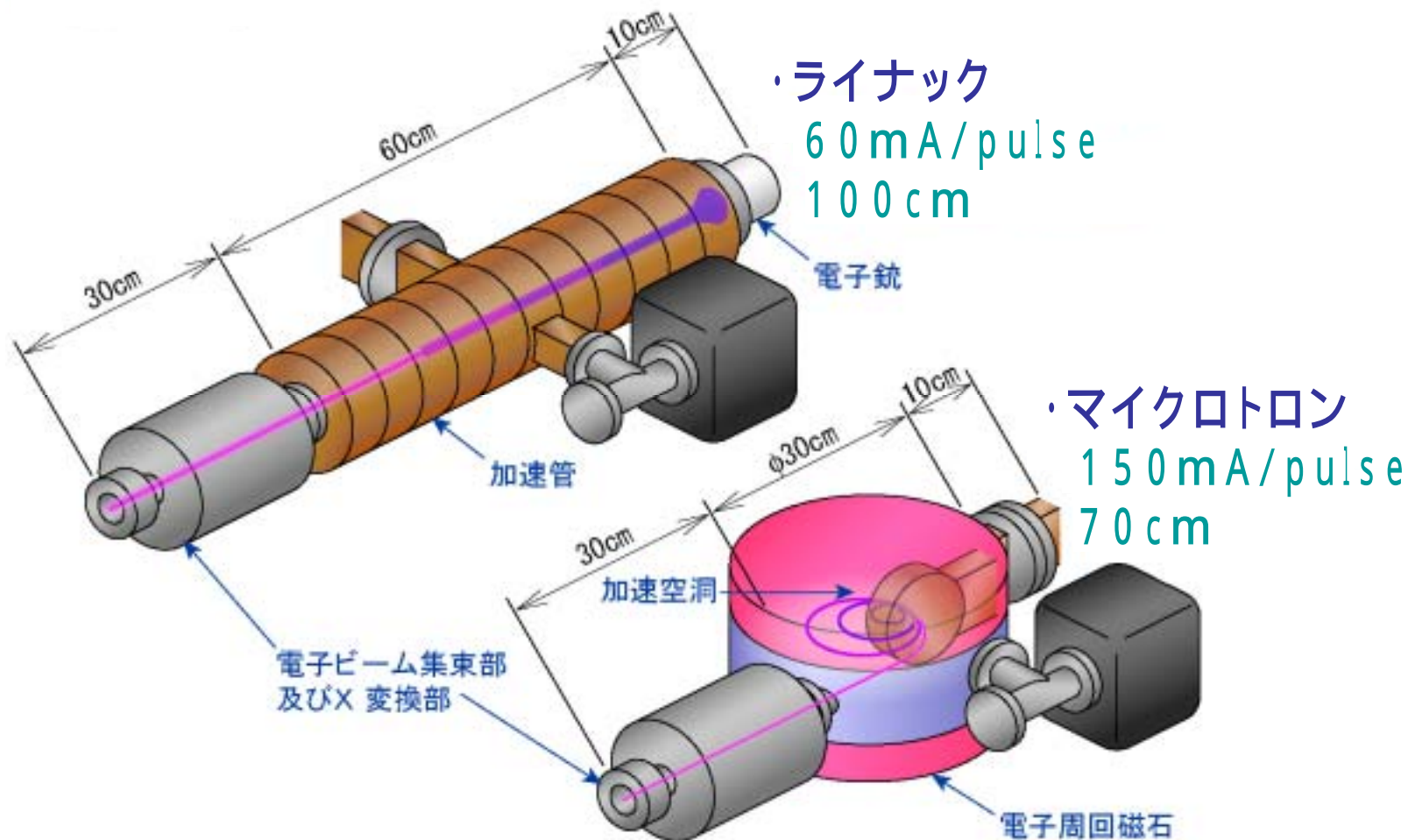
● 電子線照射装置

➡ 小型・高輝度

● 勿論、みらくるの入射器として

重量構造物高精度非破壊検査装置

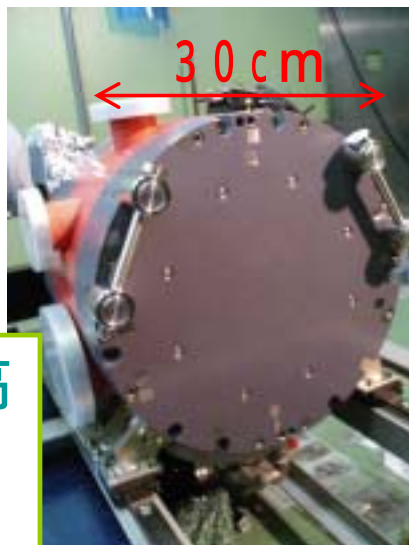
加速周波数 2,856 MHz (弊社比較)



装置構成比較



本体以外は高周波源とDC電源のみ。



電子銃に高電圧のグリッドパルサ電源が必要。

グリッドパルサが不要

滅菌・殺菌向け 電子線照射装置

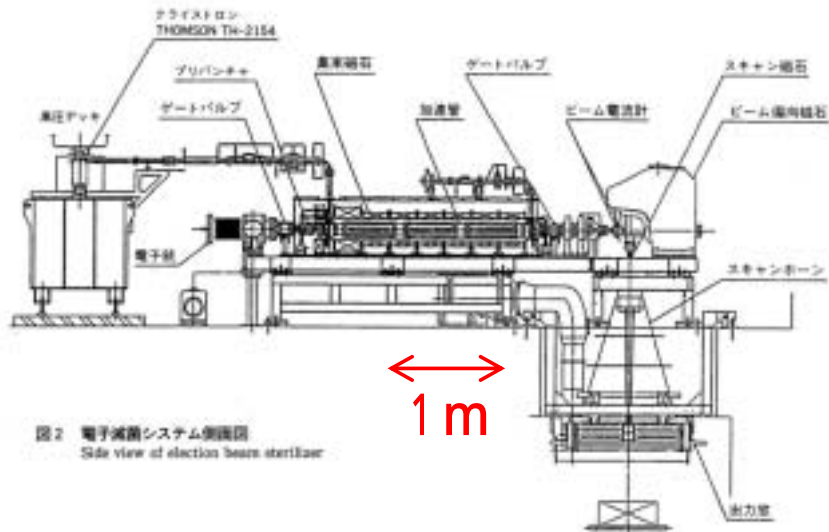
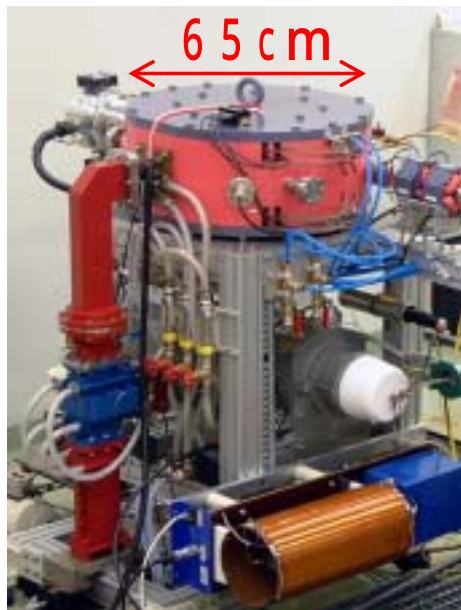
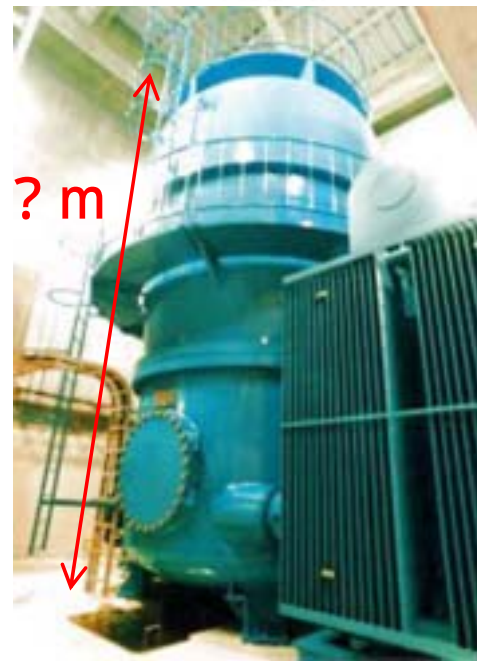


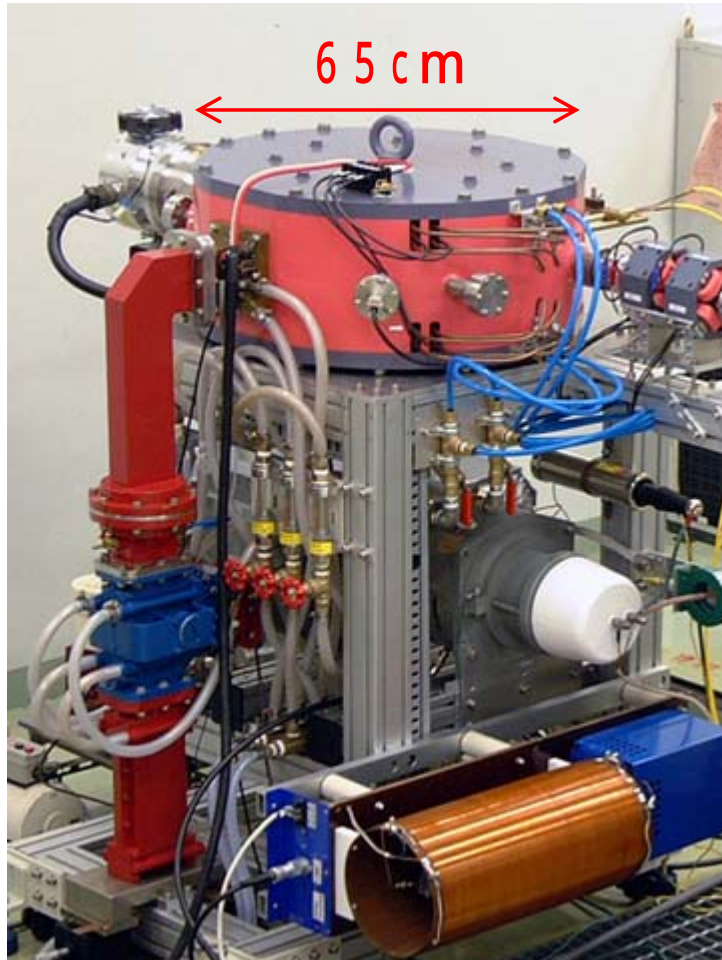
図2 電子滅菌システム側面図
Side view of electron beam sterilizer



10 MeV
出力50 kW



50kWマイクロトロン

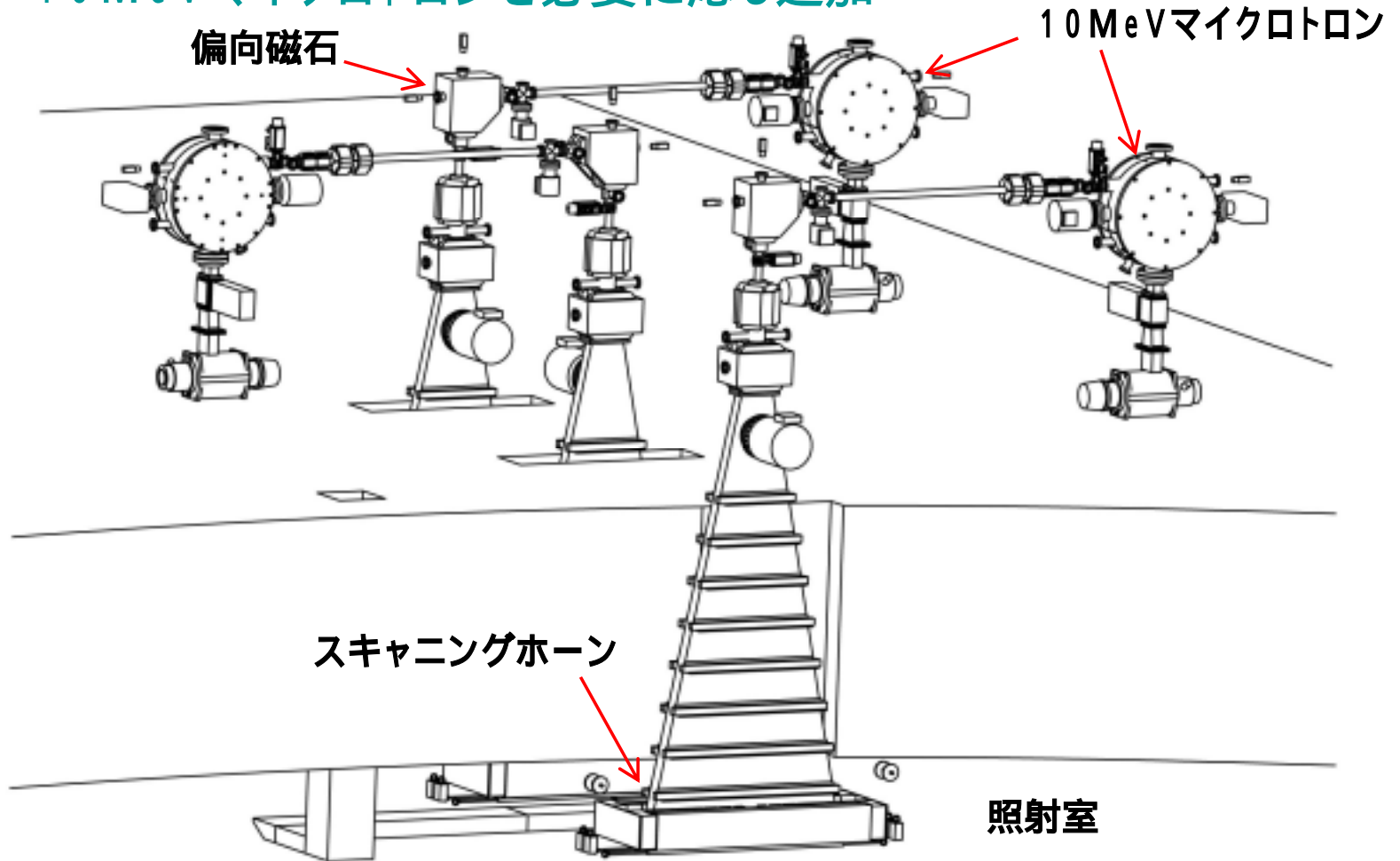


基本仕様

加速エネルギー	10 MeV
ビーム電流	150 mA (パルス)
パルス幅	6 μ s
繰り返し数	5,000 pps
平均ビーム電流	4 mA
平均ビームパワー	40 kW (将来50 kW)
磁石寸法	直径65 cm
加速周波数	2,856 MHz
クライストロン出力	3 MW (最大5 MW)
クライストロン平均出力	60 kW (将来100 kW化)
クライストロン変換効率	60%以上
所要電源容量	200 kVA以下
変換効率	40%以上

タンデム配置の電子線照射ライン

10 MeVマイクロトロンを必要に応じ追加



マイクロトロンの利用分野

みらくるの入射器としてではなく

- 重構造物の高精度X線非破壊検査装置
- ハイブリッド電子銃
- 滅菌・殺菌用電子線照射装置

加速器に対する産業界のニーズは小型化だけでなく、更に高品質・高性能へと移っています。

弊社のマイクロトロンはこのニーズに充分応えられる性能を持っており、展開が期待されます。