

PORTABLE MICROTRON ACHIEVED 300mA BEAM CURRENT

Daisuke Hasegawa^{B)}, Hironari Yamada^{A, B)}, Takanori Yamada^{B)}, Taichi Hayashi^{B)}

^{A)} Ritsumeikan Univ.

Nojihigashi 1-1-1, Kusatsu, SHIGA, 525-8577

^{B)} Photon Production Laboratory, Ltd.

Techno Factory Shiga #7, Nojihigashi 7-3-46, Kusatsu, SHIGA, 525-0058

Abstract

Small and high beam current microtron accelerators are developed for an injector of “MIRRORCLE”. Microtron lineup covers up to 20 MeV ranges. An energy distribution less than 2 %, and the peak beam current over 300 mA are achieved. Our microtron performance favors not only an X-ray nondestructive testing of a heavy structure, but also in-line EB irradiation for sterilization, and an electron gun for an injector of linac and other accelerators.

ビーム電流 300mA を達成した小型高輝度マイクロトロン

1. はじめに

我々は卓上型放射光発生装置「みらくる」を開発し、様々な応用を展開しているが、「みらくる」の入射器に用いているマイクロトロン電子加速器もまた独自に開発してきた^[1-3]。Kapitza 型のクラシカルマイクロトロン^[4]であるが、300mA の加速に成功している。マイクロトロンを用いる理由は、円形加速器であり、エネルギー分散が 2%以下と小さく、シンクロトロンへの入射に最適な、小型で高輝度な電子加速器だからである。ピークビーム電流は 1~4MeV の装置で 300mA 以上と大電流を達成している。そこで我々は、以上の特徴を生かしてみらくるの入射器としてはもちろんのこと、サブミリ解像度を出す X 線非破壊検査や滅菌・殺菌向け EB 照射装置といった産業分野への利用、より小型で高輝度な電子銃の利用を展開している。本稿では、このマイクロトロンの特長と産業利用に向けた実験の結果、開発中の EB 照射装置について述べる。

マイクロトロンのラインナップを表 1 に示す。エネルギー範囲は 1~20MeV がある。エネルギー分散が低いので、集束磁石により 1mm 程度の焦点サイズが達成できる。本体サイズは、1MeV タイプで高さ 25cm、4MeV タイプで外径 30cm、10MeV タイプで 65cm、20MeV タイプで 1.3m と小型である。

我々のマイクロトロンは加速空洞に電子銃を内蔵した Kapitza 型のクラシカルマイクロトロンで、RF 電子銃の構造をしているため高圧部が不要であり、小型で高輝度を実現している。

空洞に内蔵された電子銃から出るビームのエミッタンスは


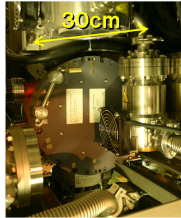
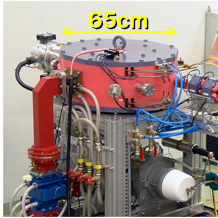

$$\epsilon_{n, RMS} = r/2(kT/mc^2)^{1/2}$$

から求められる。電子銃は、直径が 3mm で長さ 5mm の単結晶 LaB6 を約 1,800K に加熱して使用するの、 $\epsilon_{n, RMS} = 0.41 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ と求まる。

一方、熱電子の放出電流密度は Richardson-Dushman の式

2. 小型高輝度マイクロトロン

表 1 : 小型高輝度マイクロトロンの仕様

型式	MIC1	MIC1L	MIC1-EB	MIC4	MIC4L	MIC6	MIC10	MIC10-EB	MIC20
エネルギー可変幅 [MV]	0.5 - 1.5			3.0 - 4.0		5.0 - 6.0	8.0 - 10.0		12.0 - 20.0
装置イメージ 本体サイズ									
ピーク電流 [mA]	500			300		200	200	200	150
パルス幅 [ms]	2.0	5.0	5.0	2.0	5.0	2.0	2.0	5.0	1.0
繰り返し数 [pps]	1,000		5,000	500		500	500	5,000	500
平均電流 [mA]	1.0	2.5	12.5	0.3	0.75	0.2	0.2	5.0	0.075
ビーム出力 [kW]	1.0	2.5	12.5	1.2	3.0	1.2	2.0	50.0	1.5
高周波源	Magnetron 2,993MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Magnetron 2,993MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz	Klystron 2,856MHz

daisuke@photon-production.co.jp

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

から、 $\phi = 2.6\text{eV}$ として $j_{th} = 15.3\text{A/cm}^2$ が得られる。この値を空間電荷制限電流 (Child-Langmuir) の式

$$j_{sc} = 2.33E-6(V^{3/2}/d^2)$$

に代入して求めると、加速ギャップ長 2.5cm の場合には $V = 120\text{kV}$ と求まる。実際の運転では加速電圧 V を 1MV に設定しているため、その場合 $j_{sc} = 373\text{A/cm}^2$ となる。そのため空間電荷の影響を受けず電子の引き出しが可能で、高い引き出し電流と低エミッタンスを達成していることが分かる。

クラシカルマイクロトロンでは電子を一様磁場中で周回しながら加速するため、エネルギー分散が低くでき且つ加速効率を高くできる。極めてシンプルな構造で、電子エネルギーの選別を行い、選別された電子のみを加速することができる。言い換えるならば、図 1 に示すように、ライナックで用いられる電子銃・ α 磁石・加速管をひとまとめでした加速器であるといえる。

3. 産業への利用

3.1 ビーム電流の増強

みらくるの入射器としてマイクロトロンを利用するためには、ビーム電流を増強し高輝度化することが必要であった。従来の Kapitza 型が 80mA 程度のビーム電流を発生していたのに対して、我々は独自の工夫を凝らすことで、20MeV タイプで 150mA まで向上させることが出来た。管理に放射線主任者を必要としない 1MeV タイプ (950kV) では 400mA (図 2)、4MeV で 300mA とハイパワーを実現している。

3.2 X 線非破壊検査

1MeV タイプのマイクロトロンで発生した電子をターゲットにあて、X 線非破壊検査をおこなった例を図 3 に示す。図 3 はノートパソコンを密着で撮影した結果で、高精細のイメージが得られている。図 4 は 15cm コンクリートを撮影した結果で、上流に設置した 3~9mm の鋼線が明瞭に識別できる。鉄の半価層測定では 17.5mm となり、ライナックの 15mm よりも透過能が高い結果を得た。低エネルギー電子の影響が無いことによるためと考えている。

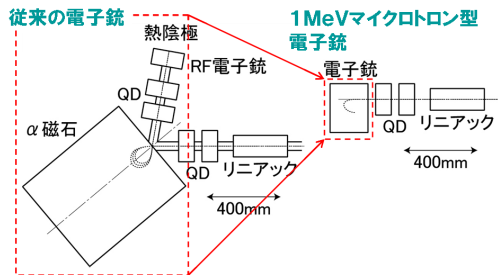


図 1 : 従来の電子銃・ α 磁石・加速管をひとまとめでした小型高輝度電子銃の図。

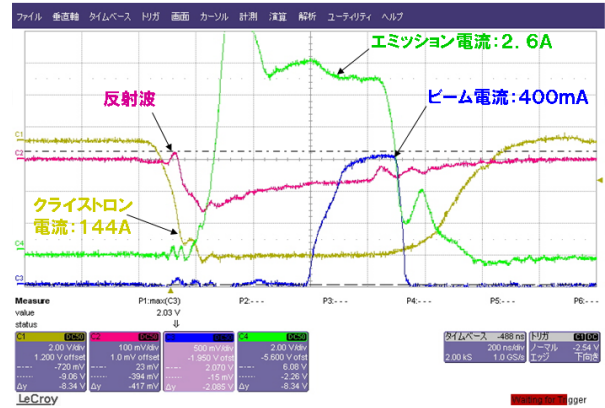


図 2 : 1MeV タイプマイクロトロンでのビーム電流、エミッション電流、クライストロン電流、高周波反射波の典型的出力波形。

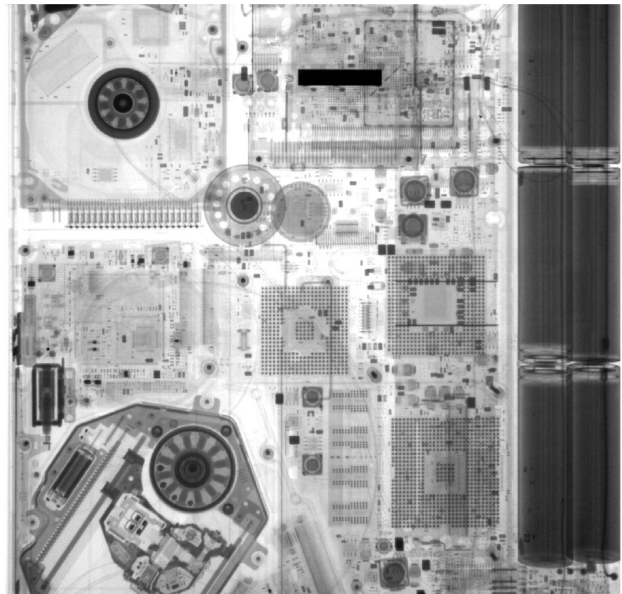


図 3 : ノートパソコンを密着で撮影した X 線イメージ。

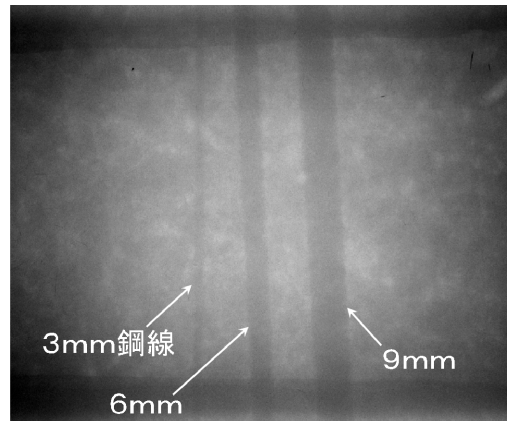


図 4 : 太さの異なる鋼線を置いた厚さ 15cm のコンクリートの X 線イメージ。

3.3 小型 EB 照射装置

小型高輝度の特徴を活かし、滅菌・殺菌用に平均出力を上げた 6MeV の EB 照射装置を開発中である。図 5 に示すように装置が小型であるため装置近傍での遮蔽ができるので、特別な遮蔽施設を必要とせず、インラインへの設置やトラックに搭載しての移動使用も可能である。

高出力化に向けて加速空洞の発熱が懸念されるが、単空洞であるため空洞中心部の除熱が容易で、冷却能力の向上で解決できる。加速空洞のモードは TM_{01} で周波数 2,856MHz の無酸素銅製の円筒形空洞である。平均の投入パワーは、使用するパルスクライストロンの平均パワー 25kW で決まり、加速に必要なパワーが 17kW、反射損失が 2.8kW、空洞壁に発生する平均損失が 5.2kW と見積もっている。ビームの出力は 12kW になる。将来、更に高出力化することを想定し、12kW の熱損失に対応した冷却機構を開発している。

マイクロトロンでの EB 照射を実用化するにあたり、EB 照射線量の測定実験を 1MeV タイプ装置にておこなった。線量の測定には線量フィルム FTW-60-1P を用い、EB 照射前後での線量をフィルムの吸光度から求めた。その結果、12W の EB 照射で 18kGy の線量を得た。ラインナップにある 1MeV タイプのマイクロトロン 2.5kW 装置と 12.5kW 装置に換算すると、それぞれ 3.75MGy/s と 18.75MGy/s の線量が得られると分かった。

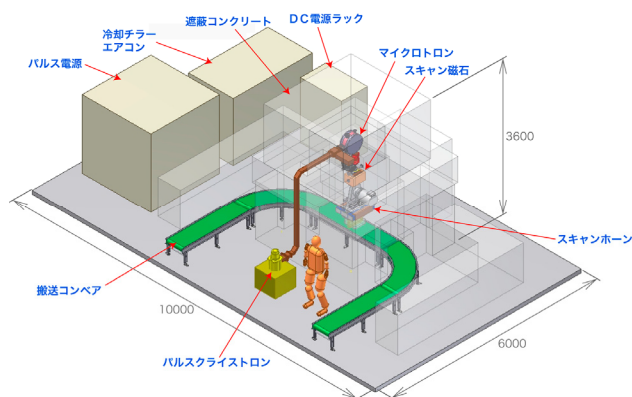


図 5：小型 EB 照射装置の鳥瞰図。

4. まとめ

我々は「みらくる」の入射器として小型高輝度の電子加速器マイクロトロンを開発してきた。ラインナップとして 1~20MeV までがあり、エネルギー分散は 2%以下で、ピークで 300mA 以上のビーム電流を達成している。今後は「みらくる」の入射器としての利用だけでなく、サブミリの解像度が要求される重構造物の X 線非破壊検査やインラインでの滅菌・殺菌向け EB 照射装置、小型で高輝度の電子銃としての利用と他分野への更なる展開に期待している。

滅菌・殺菌向けの小型 EB 照射装置の研究開発は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 22 年度イノベーション実用化開発費助成金により進めている。

参考文献

- [1] M. Haque, et al., "Performance of the far-IR beam line of the 6 MeV tabletop synchrotron light source", J. Synchrotron Rad. 16, pp. 299-306, (2009)
- [2] D. Minkov, et al., "Targets Emitting Transition Radiation for Performing X-ray Lithography by the Tabletop Synchrotron MIRRORCLE-20SX", Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Vol. 590, pp. 110-113, 2008
- [3] T. Hirai, et al., "Magnified NDI imaging using MIRRORCLE-type table-top synchrotron", AIP Conf. Proc. Vol. 902, pp. 107-110, (2007)
- [4] S. Kapitza, et al., "The Microtron: Development and Applications", The Physics and Technology of Particle and Photon Beams, Vol. 10.