

小型高輝度マイクロトロンで実現するラボサイズ EB 滅菌・殺菌装置

THE LABORATORY SIZE ELECTRON BEAM STERILIZATION EQUIPMENT ACHIEVED BY SMALL AND HIGH BRILLIANT MICROTRON

長谷川大祐^{B)}, 山田廣成^{A,C)}, 山田貴典^{C)}, 林太一^{B)}, 尾崎健人^{B)}

Daisuke Hasegawa^{B)}, Hironari Yamada^{A,C)}, Takatori Yamada^{C)}, Taichi Hayashi^{B)}, Kento Ozaki^{B)}

^{A)} Ritsumeikan University

^{B)} MIRRORCLE Centre Ltd.

^{C)} Photon Production Laboratory Ltd.

Abstract

Our microtron lineup covers from 1 up to 20 MeV. An energy distribution less than 2 %, and the peak beam current over 300 mA are achieved. So development of the laboratory size electron beam sterilization equipment (EB) with 5 kW beam power microtron is started. Because needs of small and convenient laboratory size EB machine as well as in-line irradiation are increasing instead of irradiation at the huge EB center. Our results of EB irradiation test of 1MeV microtron show that 5kW-4MeV EB machine satisfies requested throughput.

1. はじめに

マイクロトロンは磁場中で電子を回し加速する電子加速器で、旧ソ連時代の 1944 年に Vladimir Veksler によって提案され^[1]、主に東側で発展した。その後、高エネルギー向けのレーストラックマイクロトロンが開発されたが、何れも外部から電子を注入する必要があり、装置は大きく、ビーム電流も少なかった。その後、ロシアの Kapitza 研究所で加速空洞内壁に電子銃を内蔵した RF 電子銃を持つマイクロトロンが考案され小型化を果たしたが、ビーム電流は 60 mA が最大であった^[2]。日本では日立メディコが医療用に円形マイクロトロンを販売、住友重機械工業がオーロラの入射器としてレーストラックタイプを製造・販売してきた。

株式会社光子発生技術研究所は卓上型放射光装置 MIRRORCLE^[3]の開発に世界で初めて成功した会社であるが、他の加速器に比べ高性能を持つマイクロトロンを入射器に用い、マイクロトロンの高輝度化の研究も同時に進めてきた^[4-7]。小型でありながら低エネルギー分散の電子加速器はマイクロトロン以外にないことが理由である。一様磁場中で加速するマイクロトロンであるが、我々はマイクロトロンの磁場を不均一磁場にして 300 mA のピークビーム電流を出す原理を発明、これを実証した。さらに、低エネルギー分散の特徴を活かし、X 線の焦点サイズ 0.3 mm ϕ を達成、産業分野で重構造物の高精度 CT 検査で実績を上げている。

そこで、パルス幅を従来の 2 μ s から 5 μ s に延ばし、繰り返しを 1,000 pps に上げることで、ビーム出力を 1 kW から 5 kW へハイパワー化した小型のマイクロトロンを電子線照射 (EB) による滅菌・殺菌の市場へ投入することにした。背景には、従来の集約型照射方式ではなく、生産ラインや研究室レベ

ルでの EB 滅菌に需要が広がり、利便性の高い小型 EB 照射装置の要望が高まったことがある。

本稿では、まず低エネルギー分散と高輝度といったマイクロトロンの特徴について述べ、開発するラボサイズ EB 滅菌・殺菌装置について、1 MeV 装置による照射試験の結果と、平均パワー 5 kW の 4 MeV 装置での処理量の見積もり、開発する加速器要素について述べる。

2. マイクロトロンの特徴

2.1 マイクロトロンの概要

我々のマイクロトロンは、Figure 1 に示す様に、加速空洞に RF 電子銃が内蔵されたロシア Kapitza タイプのマイクロトロンである。電子は一定で一様な磁場中を周回しながら高周波空洞で加速され、所定のエネルギーに到達するとビーム取り出し管から磁石外部へ引き出される。そのため、取り出される電子のエネルギーは空洞と取り出し管の位置及び磁場強度で決まり、取り出し管のアーチャサイズと周回半径の比でエネルギー広がりが決まる。我々の 4 MeV 以上の装置ではエネルギー広がりが 2 %以下に

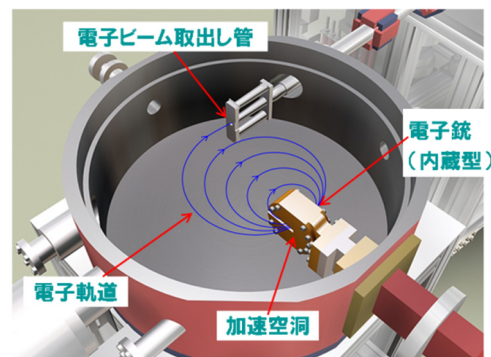


Figure 1: The illustration inside microtron with the accelerating cavity built in the electron gun.

#daisuke@photon-production.co.jp

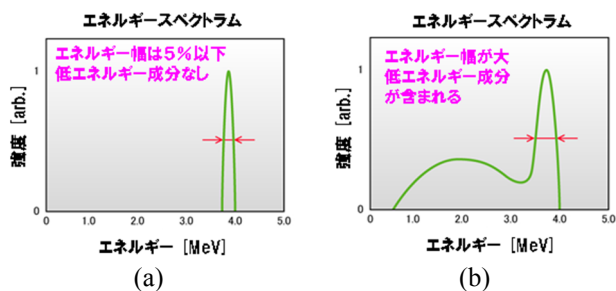


Figure 2: Comparison of an energy spread of a microtron (a) and a linac (b).

なるよう設定され、Figure 2 (a)に示す様にそれ以外の電子が全く取り出されない構造になっていることが大きな特徴である。一方、我々も LINAC を利用した経験があるが、直線に加速する LINAC では、Figure 2 (b)に示す様に低エネルギー成分が必ず含まれる。そのため、実効的なエネルギーや利用効率は低くなる。

2.2 Kapitza タイプのマイクロトロン^[2]

先に述べたように、我々が使用するマイクロトロンは Kapitza タイプであり、電子銃が加速空洞に内蔵された RF 電子銃の構造をしている。そのため高圧部が不要で、小型化と同時に高輝度を実現している。高輝度である理由を以下に述べる。電子銃から出るビームのエミッタンスは

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

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

一方、熱電子の放出電流密度は Richardson-Dushman の式

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

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

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

に代入すると、加速ギャップ長 2.5 cm の場合には $V = 120 \text{ kV}$ となる。実際の運転では加速電圧 V を 1 MV に設定しており、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に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実現している。また、磁場があるため、電子銃へのバックボンバードメントが少なく、電子銃からの引き出し電流も数 μs にわたり安定している。

上述の様に電子銃を加速空洞に内蔵することで、4 MeV 装置では電子銃の引き出し電流が 1 A であり、さらに磁場を不均一にすることでビーム電流 300 mA を達成している。加えて、エネルギー分散が 2% 以下と小さいため、高エネルギーでは他に類のない 0.3 mm ϕ の X 線焦点サイズを実現している。みらく

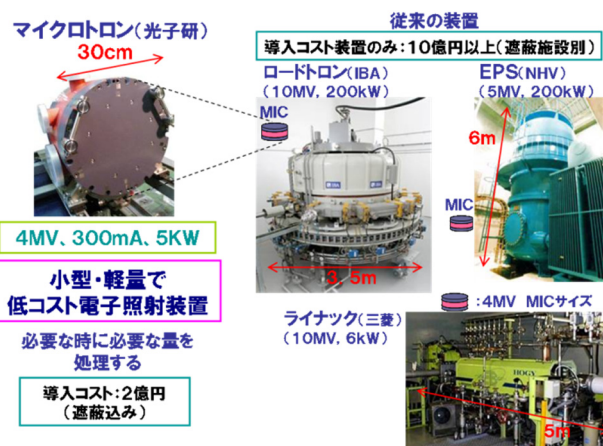


Figure 3: Comparison of electron beam (EB) irradiation equipment.

るの様に 10 $\mu\text{m}\phi$ の焦点サイズではないが、エンジン等の高精度 CT 検査システムで販売実績があり、受託による CT 検査においても各方面から高い評価を得ている。

そこで、マイクロトロンの産業利用の次のステップとしてマイクロトロンをハイパワー化し、ニーズの高いラボサイズの EB 装置を開発するに至った。

3. ラボサイズ EB 滅菌・殺菌装置の開発

Figure 3 に示すように、EB 滅菌・殺菌の分野ではビーム出力が 200 kW を超える IBA のロードトロンや NHV の EPS があるが、装置は大型で照射施設は大規模かつ高価である。そのため、EB 照射センターとして、梱包された被照射物を持ち込み照射するといった集約型照射方式がとられている。一方で、滅菌・殺菌の需要が増え、生産ラインや土壌汚染の現場、あるいは農産物の収穫現場で滅菌を行いたいというニーズが世界的に増えている。

一方、研究室レベルでは EOG 滅菌や蒸気滅菌が主流であったが、使用する EOG は発ガン性物質のため排出規制が強化され、蒸気滅菌では包装材料に耐熱耐圧性が必要であり、より手軽に内部の殺菌ができる EB 滅菌へ移行しつつある。後で述べるが、この規模の EB 滅菌の処理には数 kW のビーム出力があれば良く、我々の 4MeV マイクロトロンを 5 kW に高出力化し、利便性の高い EB 照射装置を開発することにした (Figure 4)。開発する EB 装置は生産ラインや研究室への設置を想定していること、また装置周囲の放射化を防ぐため、電子エネルギーを 6 MeV 以下としている。

3.1 1MeV マイクロトロンによる EB 照射試験

EB 装置の開発に向け、我々が所有する 1MeV マイクロトロン (MIC1) を用いて EB 照射試験をおこなった。EB 照射試験は、Figure 5 に示すように MIC1 を縦置きに配置し、上部に EB 取り出しの Be

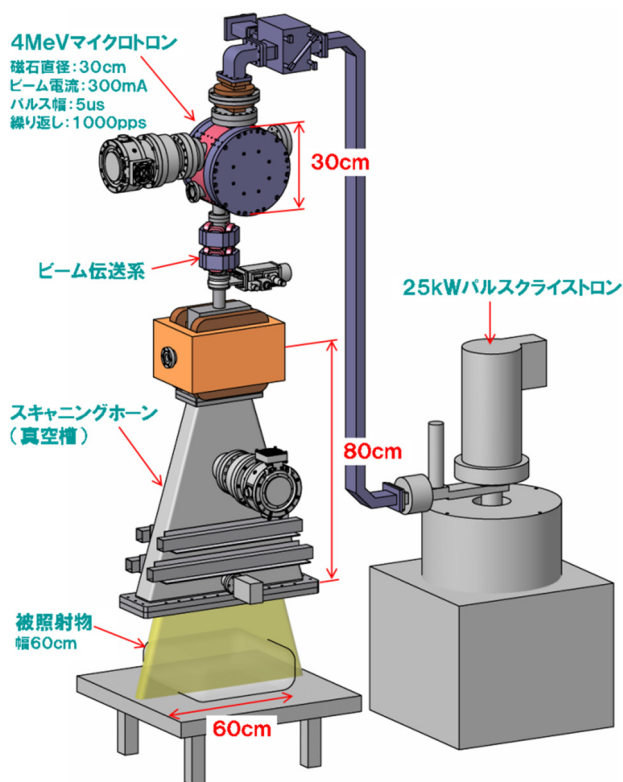


Figure 4: The illustration of 5kW-4MeV EB equipment.

窓を取り付け、その下流に Fujifilm の電子線線量フィルム (FWT-60-1P, Batch 1106, 44.5 μm) を置き線量測定をおこなった。Be 窓は、Figure 6 に示すように、スポットクーラーで空冷し、遠赤外線用カメラで温度上昇をモニタした。

線量の見積りは、EB 照射前後での線量フィルムの変色を吸収光度計 (600 nm と 605 nm を使用) にて測定し、その吸収率とフィルムの厚さから特性吸収光度を求め、線量フィルムのデータシートの値から補間により線量 Q を求めた。EB 照射は、Be 窓の加熱による破損を考え、ビーム電流 200 mA、繰り返し数 30 pps、パルス幅 200 ns、照射時間 10 s (ビーム出力 12 W) でおこなった。それぞれの線量は、 $Q_{600} = 18.83 \text{ kGy}$ 、 $Q_{605} = 18.74 \text{ kGy}$ であった。

3.2 1時間当たりの処理量の見積もり

EB 滅菌では、コンベア上を移動する被照射物へ EB を横方向にスキャンしながら照射する。ここでは上述の測定結果から、スキャン幅が 60 cm の 1 kW 装置でのコンベア搬送速度を求め、一日の処理量を見積もる。スキャン幅を 60 cm としているのは、フットプリントが 60 x 40 cm の被照射物を想定しているからである。測定結果から、12 W ビームでの照射線量 Q が 18 kGy なので、1 kW のビームパワーに換算すると $18 \times 1,000 / 12 = 1.5 \text{ MGy}$ である。これを幅 60 cm に 20 Hz で往復スキャンした場合、1 cm^2 の線量は $1.5 \text{ MGy} / 40 / 60 = 0.625 \text{ kGy}$ である。EB 滅菌に必要な 25 kGy を照射するには $25 / 0.625 = 40$ に重

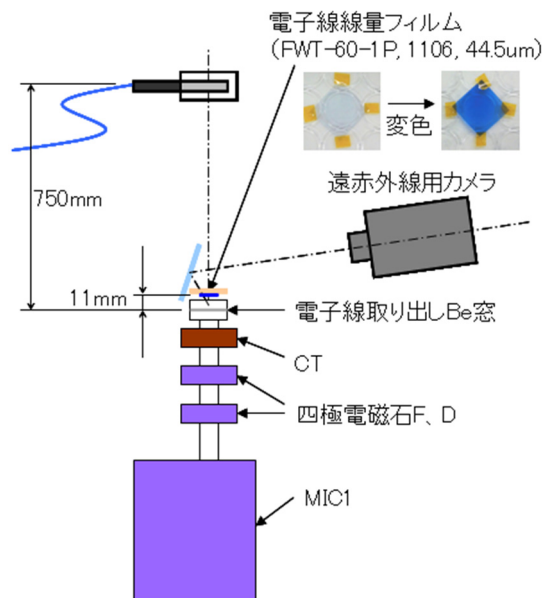


Figure 5: Arrangement for the EB dose measurement of 1MeV microtron.

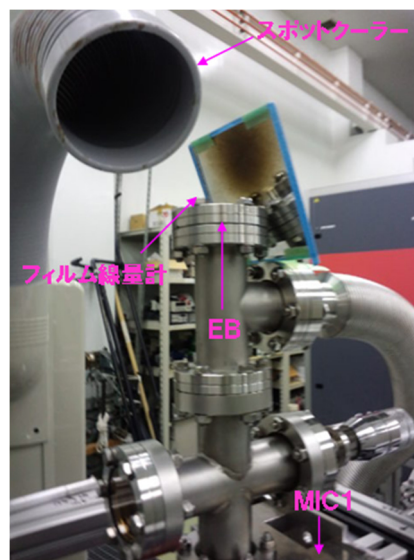


Figure 6: Photo for the EB dose measurement.

なるように照射すればよく、コンベアの搬送速度が $1 \text{ cm/s} = 60 \text{ cm/min}$ と求まる。

比重が 1 g/cm^3 の物質に対する 4 MeV 電子線の照射有効深度が 1.5 cm 程なので、 0.2 g/cm^3 の医療器具などに対しては 7.5 cm になる。殺菌効果を上げるため上下両面から EB を照射することを考慮すると高さ 15 cm と一般的な箱の半分の高さとなり、5 kW 装置だと 1 時間当たりの処理量は 100 箱相当となる。1 日 8 時間 EB 処理すれば、コンテナ 1 台分は処理できる線量であることがわかる。

3.3 マイクロトロンの高出力化

マイクロトロンの高出力化は、具体的には高周波源のクライストロンの平均パワーを現行の 5 kW か

ら 25 kW へ増強し、加速空洞の冷却を強化することで実現する。クライストロンの出力増により、運転パラメータをパルス幅 5 μ s、繰り返し数 1,000 pps に増やすことができる。1,000 pps の繰り返し数は MIC1 での十分な使用実績がある。パルス幅 5 μ s は、MIC4 における 3 μ s での長時間の安定した運用実績があること、先に述べた様にマイクロトロンではバックボンバードメントが少ないことから達成できるパルス幅である。

次に加速空洞の冷却について述べる。使用する加速空洞は TM₀₁ モードで、投入する高周波のピークパワー 3 MW に対し 0.6 MW がジュール損となる。平均すると 3.6 kW の損失となり、加速空洞の冷却を上げる必要がある。ここで特筆すべきは、円形のマイクロトロンに使用する加速空洞が単空洞であり、発熱が多い中心付近の冷却が可能なことである。従来のものより冷却水の水路断面を増した加速空洞を開発するが、単に水量を増すだけでなく発熱源である空洞中心付近の水路内表面積を広くする構造にする。

3.4 EB スキャンシステム

EB の滅菌・殺菌では、コンベア上を移動する被照射物へ、EB をスキャンホーンで走査しながら照射する。滅菌ムラを無くすため、スキャン幅 60 cm における電子線分布の平坦度を ± 5 %以下にするが、平行化磁石を使わずに達成する。EB 照射部でビームスポットが重なるようにビームサイズを広げることと、スキャン電磁石の励磁電流を、外部変調可能な電源から供給することで ± 5 %以下の平坦度を達成する。

今後の装置開発は、今年度中に加速器要素の開発をおこない、来年度は先ず 2 kW のビーム発生を確認する。来年度は、並行して、スキャンシステムの開発を進め、再来年度に 5 kW ビームでの照射調整とユーザー評価をおこなう予定である。

4. まとめ

ラボサイズの小型 EB 装置開発に関し議論し、MIC1 を用いた照射試験の結果から、生産現場や研究室での EB 照射に我々のマイクロトロンが有効であることを示した。今後は各要素の開発を進め、来年度末には 5 kW での EB 照射をおこない、再来年度はユーザー利用を通じた評価を進めていく予定である。

既に、国の内外を問わず、医療機関や医療機器メーカーから EB 装置の導入を検討する問い合わせが数十件来ており、利便性の高いラボサイズの小型 EB 装置へのニーズがある。また、海外からは農産物の収穫現場での EB 照射のニーズもあり、遮蔽ごとトレーラーに搭載できる EB 装置を求める声もある。医療機器のみならず、食品の安全性を確保するためにも EB 滅菌は今後ますます重要になる。

マイクロトロンのハイパワー化により、弊社製品の卓上型放射光装置みらくるシリーズや、MIC シ

リーズを線源とする非破壊検査装置の X 線強度アップも達成される。卓上型放射光装置みらくるは弊社が製造販売する装置で、XAFS や応力測定・蛍光 X 線分析・高精度 CT 撮影といった高度 X 線分析、THz 分析が可能である。ハイパワー化による線量の増加により分析時間が短縮され、EB 滅菌だけでなく他の X 線利用分野への波及効果も期待される。

参考文献

- [1] Veksler, I. V., "A New Method of the Acceleration of Relativistic Particles", Doklady Akad. Nauk SSSR 43, 346, 1944
- [2] S. P. Kapitza, et al., "The Microtron: Development and Applications", The Physics and Technology of Particle and Photon Beams, Vol. 10, 1978
- [3] H. Yamada, et al., "Tabletop Synchrotron Light Source", In: Brahme A. (Editor in Chief.), Comprehensive Biomedical Physics, vol. 8, pp. 43-65, Amsterdam: Elsevier, 2014
- [4] H. Yamada, et al., "X 線橋梁検査のための MIC 電子加速器", 検査技術, No. 1, Vol. 18, 2013
- [5] D. Hasegawa, et al., "Industrial Use of Small and Brilliant Microtron", Proceedings of the 9th Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 3-5, 2013
- [6] D. Hasegawa, et al., "Portable Microtron Achieved 300mA Beam Current", Proceedings of the 8th Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [7] <http://www.photon-production.co.jp/index.htm>