

電子線滅菌用 10MeV リニアックの開発

松尾 健一¹、山本 昌志、白川 忠秀、金子 七三雄
荒井 秀幸、三尾 圭吾
石川島播磨重工業株式会社
〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町 1

概要

医療や産業の様々な分野で電子線を応用した技術が注目されている。我々は電子線滅菌をターゲットにして小型の電子線加速器の開発を行ったので、その開発内容と性能評価について報告する。加速管は、長さ 1.2m、バイペリオディック型の S バンド加速管である。電子銃には DC20kV の 3 極管カソードを用いている。RF 源にはクライストロンを使用した。この加速器により最大エネルギー 10MeV、1.5kW の電子線出力(パルス幅 4 μ s、繰返し数 150pps、平均電流 0.15mA)を得ることが可能である。Ti 箔出力窓(40 μ m 厚)より照射された電子ビームは、スキャン方向に長さ 400mm、幅 20mm の照射範囲を持つことを確認した。照射機本体は高さ 2.85m で垂直照射型のコンパクトな設計となっている。

1. はじめに

コンパクトかつ大出力照射可能な電子線滅菌システムの実現を目指し、本装置の開発を行った。このシステムの主な特徴は以下の 3 点である。(1)垂直照射型で装置本体は高さ 2.85m のコンパクトな構成である。(2)電子ビームエネルギー 10MeV、1.5kW の比較的高出力のビームパワーを得ることが可能で、被照射物の選択肢が広がる。(3)最大照射幅 400mm に即した滅菌対象物の大きさが選定できる。

本システムの主な性能仕様を表 1 に示す。本システムは、医療廃棄物や医療用具などの滅菌装置としての実用が可能であり、EOG などのガス滅菌や Co⁶⁰ などの線滅菌装置に代わるクリーンな滅菌装置として注目される。

以下に本装置の構成と調整・評価試験結果について述べる。

表 1. 電子線滅菌システムの主要仕様

電子ビームエネルギー	10MeV
ビーム出力	1.5kW(at150pps, 250mA)
加速周波数	2856MHz
ビーム電流	250mA (ピーク) 0.15mA (平均 at150pps)
ビームパルス幅	4 μ s (平坦部)
パルス繰返し	150pps (at1.5kW) 10 ~ 200pps (可変)
ビームスキャン幅	400mm (可変)



図 1. 電子線照射装置外観

2. 電子線照射装置の構成

2.1 全体構成

図 1 に本装置の加速器部本体の構成図を示す。本システムは、加速器部とともに RF 源(クライストロンおよびパルストランス)、冷却水循環装置、電子銃用高電圧直流電源(DC20kV)、電磁石および真空排気装置の電源制御盤、クライストロン用パルス電源盤等で構成される。各種インターロック機能を設け、ユーザーおよび装置の安全性を確保できる設計となっている。

2.2 電子リニアックの構成

電子線の加速部は、電子銃、プリバンチャー、加速管によって構成される。

電子銃には直流 20kV の高電圧を印加し、グリッドパルス電圧のスイッチングでカソードからの電子の

¹ kenichi_matsuo@ihi.co.jp

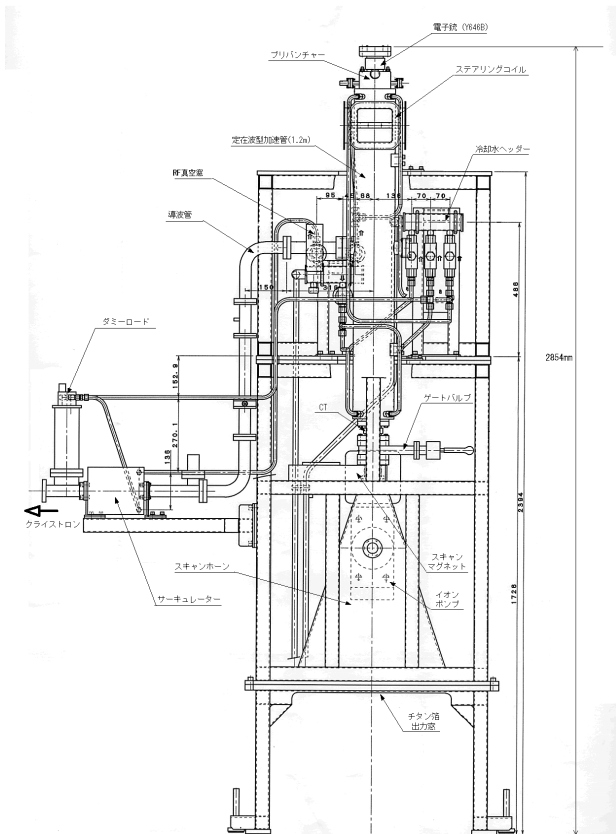


図 2. 電子線照射装置本体構成図

引出し制御を行う。カソードには Ba 含浸型 3 極管カソード(EIMAC 社製 Y646B)を使用しており、ヒータの加熱によりカソード表面より熱電子が放出される。

電子銃の後段に設けたプリバンチャーは定在波型の 1 空洞で、加速管への入射直前の電子に速度変調を与え、ビームの透過率向上とエネルギー拡がりの抑制機能を持つ。設計バンチング電圧 3.9kV を得るために必要なプリバンチャーへの入力 RF パワーは 1.02kW となる設計になっている。

全長 1.2m の定在波型加速管は、バイペリオディック型空洞 23 個で構成されている。加速管中央の空洞にはクライストロンからの RF パワー (2856MHz、最大定格ピーク出力電力 7.5MW) が入力され、加速管入口から 4 個目までのバンチャー空洞でビーム速度を光速近くまで加速する。後続の 19 空洞はレギュラー部で、加速管から出力された電子は 10MeV の運動エネルギーを得る設計となっている。加速管の製作には、無酸素銅の超精密旋盤加工技術と真空炉での拡散接合およびロウ付技術を駆使している。

また、加速管には冷却水孔を設け、熱の弊害による周波数特性などへの影響を抑えるために運転温度 40 ± 1 の温度制御を行っている。

加速管入射部側面には、ステアリングコイルを設け、ビームの軌道を微調整できる機構になっている。本装置は、装置の簡素化を図るため収束磁石は設置していないが、より厳格な照射線量およびエネルギー管理が必要な場合には、収束磁石の設置仕様も検討している。

加速器部の真空度は、電子銃ポート(排気速度 2L/sec)とスキャンホーンポート(排気速度 100L/sec)に 2 個のイオンポンプを設け、ビーム照射時で 5×10^{-5} Pa 程度に維持している。

2.3 照射部の構成

加速管から出力された電子ビームは、後段に設置されたスキャンコイル通過時に、スキャン周波数 19Hz の三角波の磁場によりローレンツ力を受け、左右に偏向を受ける。偏向走査された電子ビームは長さ約 750mm のスキャンホーンを通り、厚さ 40 μ m のチタン箔出力窓より大気側に照射される。チタン箔窓の 155mm 直下に線量計を配置し、線量評価を行った。

3. 加速器設計および性能評価

3.1 ビーム軌道解析とビーム特性評価

ビームトラッキングコード GPT(General Particle Tracer)を用いてビーム軌道解析を行った。カソード表面からプリバンチャー入口 ($z=20$ mm) までの EGUN による軌道解析結果と SUPERFISH によるプリバンチャーおよび加速管空洞の電磁場解析結果を GPT に反映させている。

図 3 にビーム軌道解析により得られた透過率及びビーム径(標準偏差・最大径)の変化を示す。但し、プリバンチャーの RF 入力電力(1kW)および RF 位相は最適化している。加速管までの空洞径は直径 7mm、加速管内は直径 24mm である。

調整試験での透過電流量測定は、加速管後段に設けた CT により行った ($z=1300$ mm 付近)。同条件におけるビーム電流測定から約 40% の透過率を確認した。解析に比べ透過率が劣化しているのは、実機のプリバンチャーの電圧が低下していることが原因であると推測する。カソードからの放出電流は、定格で 620mA 程度で安定になるようヒータ電流およびグリッドパルス電圧などで制御しているが、消失した電流のほとんどは加速管入射部で消失している。従

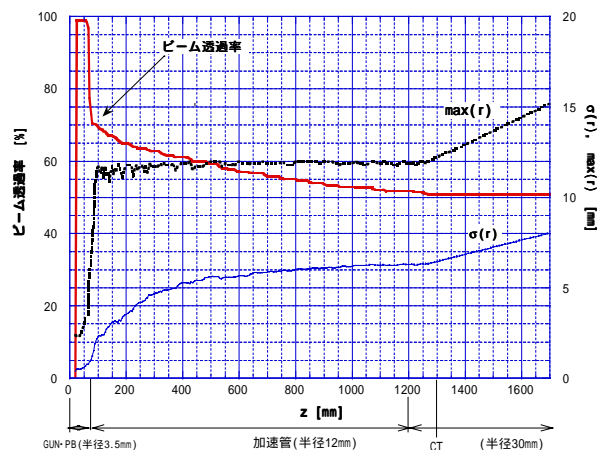


図 3. 透過率とビーム径の GPT による解析結果

って、電子銃での初期加速電圧を増すことで透過率を向上させることは可能であるが、高電圧化に伴う耐圧対策と電源容量の改造などによる装置の巨大化とコストアップが否めない。本装置では仕様に十分な電流量が得られている。

±15°の振り角でスキヤニングされ大気中に照射されたビームを、Ti 泊窓直下 155mm 位置に設置した塩化ビニールの変色を調べた結果から、スキヤン方向に長さ約 500mm、幅約 25mm の照射範囲を持つことを確認した。解析での加速管通過後の最大ビーム径の直径約 30mm、標準偏差で直径約 16mm であったことから、スキヤン方向長さ 400mm×幅 20mm は妥当な有効照射範囲であると考えられるが、厳密な線量測定による確認が必要である。

3.2 ビームエネルギーの評価

電子ビームエネルギーは、アルミニウム(比重 2.70g/cm³)試料による深度方向線量分布測定により評価した。図 4 に他の加速器で測定した比重 0.4g/cm³の試料の結果との比較を示す。比較試料はビームエネルギー10MeV 値であり、本加速器への入力 RF パワー 5.3MW(クライストロン出力 5.8MW)では 12.2MeV 程度で仕様を超過していると判断できる。解析では、10MeV ± 0.5MeV 程度の拡がりを持つという結果を得た。

3.3 ビームローディングの検討

電子ビームエネルギーは、加速管への RF 入力パワーに依存するが、一方で電子がエネルギーを得た分 RF のエネルギーは減少し、加速電圧は低下する。そこで、電子の電流と加速電圧の関係であるビームローディングを考慮し、加速電圧が 10MeV となる RF 入力パワーの検討を行った。

定常状態における加速管のビームローディングの関係式は式(1)のように表される^[1]。

$$V = \frac{2\sqrt{\beta_0}}{1+\beta_0} \sqrt{P_0 r l} - \frac{r l i}{1+\beta_0} \quad (1)$$

表 2 に各加速管パラメータを示す。(1)式より得られる加速管への入力 RF パワーは、P₀=4.2MW である。図 5 にこのときのビームローディングの関係と実測結果を示す。RF パワーはクライストロンの出力電力から導波管ロスで-0.4dB として算出し、ビームエネルギーは上記の深度方向線量分布測定により、また、ビーム電流は加速管出口の CT により求めた。これらの測定誤差は数%程度あると考えているが、それを考慮しても計算と実測結果はよく一致している。

表 2. 加速管の主要パラメータ

ビームエネルギー	V	10MeV
カップリング	β ₀	2.35
シャントインピーダンス	r	53.2MΩ/m
加速管長	l	1.10m(0.9 β=v/c)
ビーム電流	i	0.25A
Q ₀ 値	Q ₀	17894(95% to Cal.)

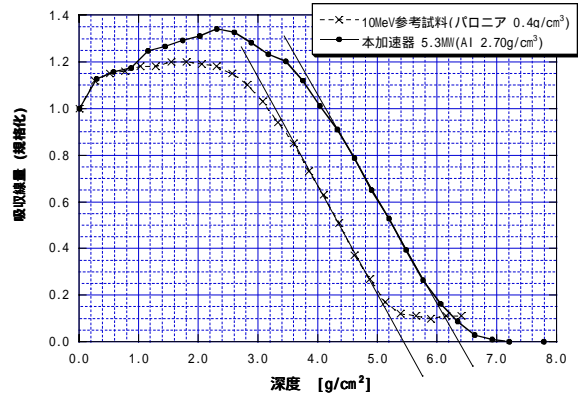


図 4. 深度方向線量分布によるビームエネルギー測定

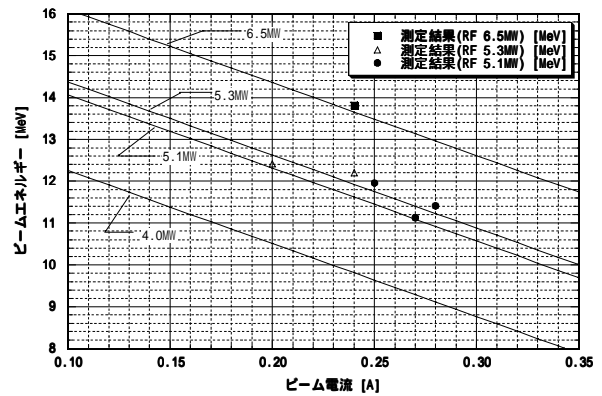


図 5. ビームローディングの計算結果と実測結果

4. まとめ

本加速器では、加速管への RF 入力パワーを 4.2MW 程度(クライストロン出力 4.6MW)に制御することで、電子エネルギー10MeV、ビーム電流量 250mA の安定した電子ビームが得られる性能であることが分かった。またこのとき、デューティ 0.6×10⁻³(パルス幅 4μs × 繰返し 150pps)の運転で 1.5kW のビーム出力を達成できる。有効な照射範囲も 400mm×20mm 程度であることを目安を付けた。

本装置はクライストロン出力パワーに十分余裕のある装置であるが、今後は、計算で得られた RF 入力時でのビームエネルギーの確認とそれを評価するための線量分布測定技術の確立を課題として取り組む予定である。

参考文献

- [1] C.J.Karzmark, et al., "MEDICAL ELECTRON ACCELERATORS", pp82