

[13P-09]

DEVELOPMENT OF SMALL C-BAND STANDING-WAVE ACCELERATOR STRUCTURE

S. Miura, *N. Habara, *Y. Kamino, A. Takahashi, N. Hisanaga, H. Sekido, A. Yoshizumi, **T. Shintake, **H. Matsumoto

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Mihara Machinery Works
5007, Itozaki-cho, Mihara-shi, Hiroshima, 729-0393 Japan

*Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Nagoya Aerospace Systems
10, Oye-cho, Minato-ku, Nagoya, 455 Japan

**KEK: High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

Abstract

We have newly developed a compact C-band (5712MHz) standing-wave accelerator for the medical product/waste sterilization applications. The accelerator consists of an electron gun operating at 25 kV DC followed by a single-cell pre-buncher and 3-cell buncher section, and 11-cell of the side-coupled standing-wave accelerating structure. The total length including the electron gun is about 600 mm. The first high-power test was performed in March 2000, where the accelerator successively generated the electron beam of 9 MeV energy and 160 mA peak-current at 3.8 MW RF input power. Mitsubishi Heavy Industry starts to serve the sterilization systems using C-band accelerator reported here, and also supplies the accelerator components for the medical oncology applications.

超小型Cバンド定在波型加速管の開発

1. はじめに

今回、我々は電子滅菌装置用として、超小型Cバンド定在波型加速管を開発し、ビーム試験を行った。加速管は、加速電圧 25kV の電子銃、1 空洞プリバンチャ、3 セルバンチャ部、サイドカップル型レギュラー空洞からなり、全長は電子銃を含めて約 600mm であり、RF 入力パワー 3.8MW で、160mA、約 9MeV のビームが得られた。本加速管の設計、試験結果について報告する。

2. 加速管全体計画

本加速管は、従来の集約型滅菌装置用ではなく、病院などの廃棄物の滅菌を目的とした分散型滅菌装置用であり、加速管本体を小さくする必要がある。このため、RF 周波数は、加工の容易さも考慮して、C-バンドの 5712MHz を選択した。

加速管レギュラー部についてはシャントインピーダンスを高くとれるサイドカップル型構造を採用した。ビームの不安定なバンチャ部については 3セルディスクロード型構造とし、加速電場の軸対称性の崩れによる電子ビームの曲がりを押さえた。さらに、電子のバックスキヤタリングによるカソードの寿命低下を防ぐため、電子銃とバンチャ間には、加速管本体とは RF 別フィードのプリバンチャを設けた。電子銃加速電圧は、制御機器のコストを考慮

して、25kV と低い値に設定したため、加速中のビームの発散を防ぐため、電子銃-プリバンチャ-バンチャ間は機械的制約の許す限り短くとった。加速管全体図を図 1 に示す。

サイドカップル型構造の加速管レギュラー部実効シャントインピーダンスは $130\text{M}\Omega/\text{m}$ と設定し、加速ビームは 100mA、10MeV とし、最大 250mA まで加速できることとし、RF 源はコストを考慮し 5MW 以下となるように加速管長さ、結合係数 β を決定した。加速管長さは電子銃を含めて約 600mm となった。また、バンチャ部の実効シャントインピーダンスはレギュラー部に比べて低くなり、加速管全体としてのシャントインピーダンスは低くなるものと予想される。このため、ビームエネルギー、ビーム電流値には 10% の余裕をみた。これらを表 1 に示す。

表 1 : C-バンド加速管パラメータ計画

実効シャントインピーダンス	130M Ω /m
加速セル数	13
実効加速管長	0.341m
RF 入力パワー	4.2MW
結合係数 β	2.3
ビーム電流(A)	エネルギー(MeV)
0	11.4
0.1	10.0
0.25	8.1

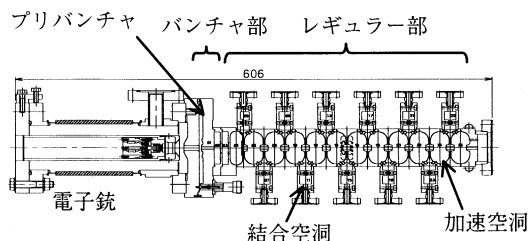


図 1 : C-バンド加速管全体図

3. 電子銃

カソードは EIMAC Y-646B を選択した。本カソード直径 $\phi 8\text{mm}$ 、最大ビーム電流 0.75A と本加速管の仕様としては十分である。ウェネルト形状は、バンチャ第 1 空洞中心で最小ビーム径となるよう、解析コード E-GUN を用いて設計した。図 2 にシミュレーション結果を示す。バンチャ第 1 空洞中心で約

$\phi 2\text{mm}$ 弱のビーム径となっていることがわかる。同時に電子銃単体でのビーム試験を行った。実機電子銃を用いて、アノードとファラデーカップを製作し、ワイヤースキャナーにてビーム径と電流値を測定した。 $I=0.22\text{A}$ の時のビーム径測定結果を図3に示す。ビーム径は 2σ (正規分布でピークに対して13.5%の値) の値をプロットした。軸方向距離はシミュレーションと合わせてある。ビーム径はE-GUN シミュレーションとほぼ等しいが、バンチャ第1空洞中心でやや径方向に広がり傾向であることがわかる。

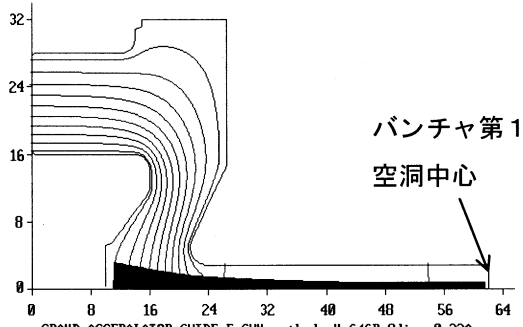


図2：E-GUN シミュレーション ($I=0.22\text{A}$)

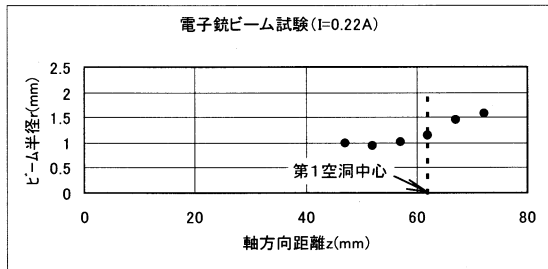


図3：電子銃ビーム試験結果

4. バンチャ部

4.1 プリバンチャ

プリバンチャは単空洞型とし、RF フィードの関係から TM02 モードを採用した。空洞の周波数は superfish を用いて計算し、ギャップ電圧は、バンチャ第1空洞中心で最小バンチャ長となるよう設計した。プリバンチャでのビームローディングはほとんど無いため、カップリング係数 β は1で設計した。バンチングの焦点距離は約 20mm で、入力 RF 電力は約 1kW 程度となった。RF は N 型フィードスルーにて供給することとした。

4.2 バンチャ

バンチャ部は加速電場の軸対称性を確保するため3セルディスクロード型とした。バンチャ部のギャップ電圧は低い方がバックスキャタリングのエネルギーが低くなるが、あまりに低いと、電子ビーム速度が相対論領域に入らず、RF パワー変動や、ビーム電流値が少ない時のビームローディングの変化に対して、レギュラー部でのビーム位相と RF 位相の変動が大きくなってしまいます。そのため、バン

チャ部のギャップ電圧はやや高めに設定した。空洞間のカップリングは superfish にてギャップ電圧設計値となるように、ディスクビームホール径を設計した。空洞長さは、各空洞での電子平均速度を手計算にて求め、その後、レギュラー部を含めて軸対称 2.5 次元の PIC (Particle-in-cell) Code EMSYS を用いてビームシミュレーションを行い、詳細に空洞長を決定した。

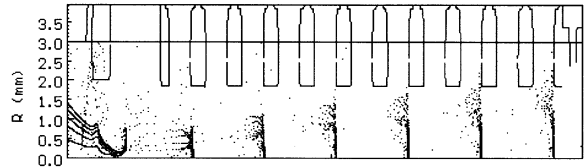


図4：EMSYS ビーム解析

5. レギュラー部

レギュラー部はカップリングホールによる Q 値の劣化等を約 15% と見積もり、superfish で計算上実効シャントインピーダンス $150\text{M}\Omega/\text{m}$ となるように設計した。ビームホール径は $\phi 3.7\text{mm}$ となった。セル間のカップリングは 3% と設定し、解析コード MAFIA にてカップリングホールの大きさを決定した。

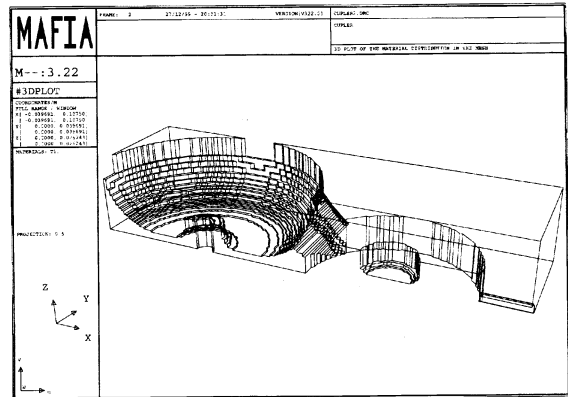


図5：レギュラー部 MAFIA 計算モデル

6. 製作

加速管本体は無酸素銅製とし、加速空洞内面は超精密加工旋盤により 0.1S に仕上げた。結合空洞は2分割構造とし、結合空洞と加速空洞を単体にて真空ろう付けした後、各加速空洞を真空ろう付けにより組み立てた。加速空洞と結合空洞間のカップリングホールは軸に対して 45° に傾けたフライス盤にて加工し、カップリングホール周辺に鋭利なエッジがたつことを防ぐと同時に、カップリングの大きさを自由に変えられることとした。(図6)

加速空洞の周波数はノーズコーン高さを修正加工することで調整し、 $5712 \pm 0.5\text{Mhz}$ 以下に追い込んだ。

加速管本体と電子銃は MO 型真空フランジで取り合った。本真空フランジは KEK 松本先生の開発されたもので、真空側内面に凹凸ができず、また、フランジ面どうしが完全に接触するため、放電防止

及び、電子銃の倒れ防止に有用である。(図8)

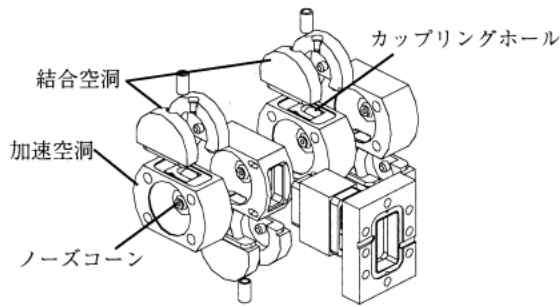


図6：加速空洞と結合空洞

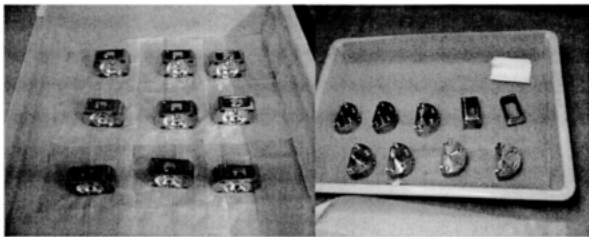


図7：加速空洞と結合空洞

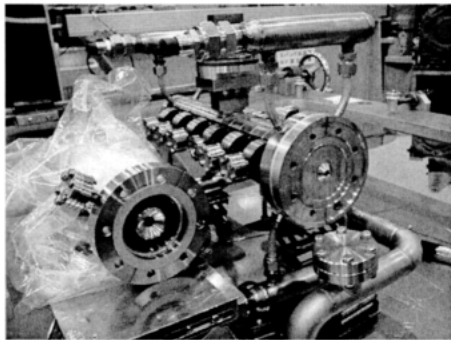


図8：電子銃とMOフランジ

7. ビーム試験

ビーム試験は MHI 広島研究所の電子照射施設内にて行った。クライストロンはトムソン製 5MW のもので、これをドライブする 500W 出力のサブスタークライストロン、モジュレータ、RF 励振系、トリガー系は KEK よりお借りした。

ビーム試験レイアウトは図9の通りである。加速管ビームライン上にはカレントモニタ、プロフィールモニタが設置されており、これらにて加速管出力電流値、ビームサイズの測定を行った。また、エネルギー分析時は、ビームライン上のベンディングマグネット ON し、ビームを 180° 曲げて 6mm 幅のスリットを通過させた後、さらに 90° 曲げ、カレントモニターを通過させ、ビームダンプに入射させる。ビームスリットのエネルギー分解能は約 2% である。

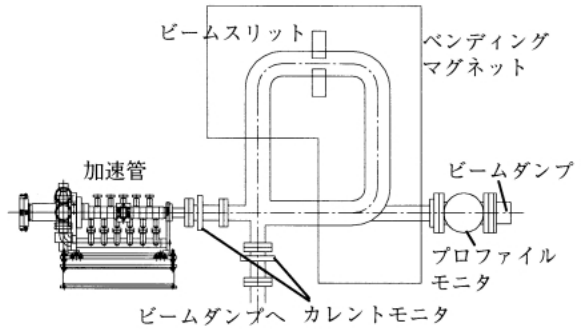


図9：ビーム試験装置レイアウト

図10に本加速管のビームローディングカーブを示す。横軸はビーム電流値、縦軸はビームエネルギーである。図中実線は理論値であり、理論値よりも測定値の方が、エネルギーが高いのは、理論値はビームエネルギー、電流値に 10% の余裕をみているためである。測定値は、理論値曲線に良く沿っていることがわかる。

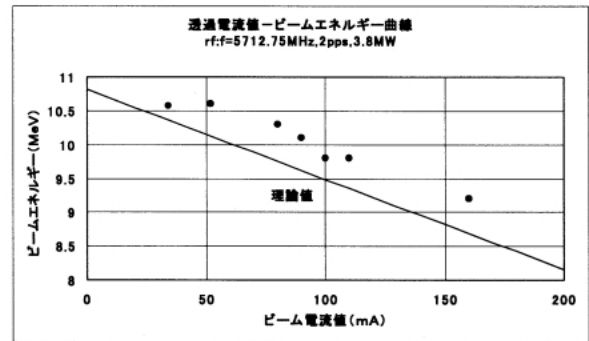


図10：ビームローディングカーブ

図11にビーム電流 52mA、100mA、160mA 時のエネルギー分散曲線を示す。それぞれのビーム電流値でピークは 10.6、9.8、9.2MeV 付近にあり、エネルギー幅は半値幅で約 300~400keV 程であった。

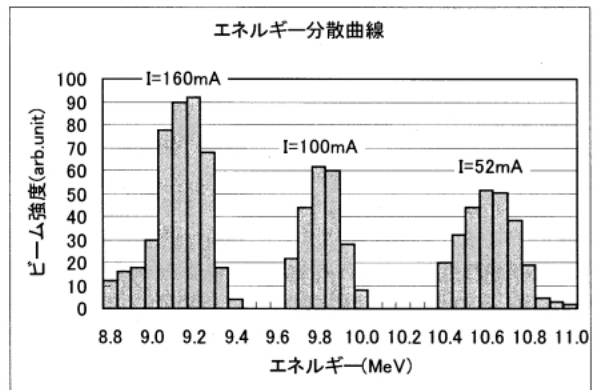


図11：エネルギー分散曲線

8. おわりに

今回、我々は RF 入力パワー 5MW 以下、10MeV、100mA 級の Cバンド加速管ビーム試験に成功した。本加速管は、その小型である利点を生かして、電子滅菌装置用のみならず、医療用、画像処理用等の様々な分野への応用が期待される。