

[2 a - 8]

## DEVELOPMENT OF 10 MeV 25KW CLASS STERILIZATION LINAC SYSTEM

Y. Kamino\*, N. Hisanaga, Y. Itaya

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

### ABSTRACT

A 10MeV 25KW class electron LINAC was developed for sterilization of medical devices. The LINAC composed of a standing wave type single cavity prebuncher and a 2m electro-plated traveling wave guide uses a 5MW 2856MHz pulse klystron as an RF source and provides 25KW beam power at the Ti alloy beam window stably after the energy analyzing magnet with plus-minus 1 MeV energy window. The practical maximum beam power reached 29KW. The control of the LINAC is fully automated and realized the "One-Button Operation" which is valuable for easy operation as a plant system. 2 systems have been delivered and are being operated stably.

### 10MeV 25KW級電子滅菌用リニアックシステムの開発

#### 1. はじめに

医療器具の滅菌用として10MeV20KW級のビーム出力を有するSバンド電子リニアックの工業適用が始まってから約10年になり、国外メーカ数社が同クラスのリニアックシステムを供給しているが、20KWを越える大出力域で安定に稼働できるシステムは皆無に近い。一方、滅菌処理量の増大に伴い、性能上の余裕の点から25KW以上のビーム出力が安定に得られる機種の開発が望まれていた。当社では、1994年に全自動化電子滅菌工場設備を株式会社ホギメディカル殿より受注し、その主要設備として定格ビーム出力10MeV25KWの電子滅菌リニアックシステムの開発・納入に成功したので報告する。

#### 2. 設計方針

従来の10MeV20KW級のSバンド電子リニアックの大出力域での不安定は、厳しい熱負荷による加速管及びそれ以降のビーム輸送系の動作不良が主要な原因であった。小型のSバンド定在波型加速管内で20KW~30KWのRFパワーが消費されているケースもあり、更にこれに加速管内でのビーム損失による熱負荷が加わって、不均一でしかも大きな加速空洞の歪みが発生して動作不安定が発生していた。当社システムでは、加速管を含めてあらゆる部分のRFロス及びビームロスを極小とし、熱負荷を極限まで減少して大出力時のシステムの安定性を確保することを設計方針とした。

#### 3. システムの概要及び主要性能

本リニアックシステムの概略構成を図-1に示す。また、システムブロック図を図-2に示す。

主要性能・運転諸元の実績値は以下の通りである。

Beam Energy	: 10.0MeV
	variable from 9 to 11MeV
Energy Spread	: 1MeV (90% beam current)
Beam Power at	: 25KW (guaranty) PPS=550Hz
beam window	: 29KW (actual) PPS=630Hz
PPS	: 700Hz (Max)
Beam pulse width	: 13.5 micro sec
Beam current	: 340mA peak
Frequency	: 2856MHz
Klystron power	: 5MW peak
Irradiation Surface	: 60cm from the beam window
Beam spot size	: 16cm diameter
	on the irradiation surface
Beam Scan Width	: 30cm to 80 cm variable
Scan Frequency	: 5.1Hz (Typical)
Scan Uniformity	: plus minus 2%

#### 4. 加速管

加速管としては長さ2mのCG型電鍍管を使用した。空洞数は60であり、最初の8空洞はテーパ型パンチャ空洞で以降の52空洞がCG型のレギュラ空洞である。ロードライン解析により、4.8MWのRF入力に対して設計電流値360mAで10MeVが最大変換効率の点で得られるよう減衰定数は0.38 Neperとした。ビームのエネルギー幅を最小としエネルギー変換効率を最大とするためには、加速位相クレストにパンチャが乗るようにする必要があるが、電子の位相トレース解析を用いてテーパ型パンチャ空洞の諸元（ディスク間隔及びビームホール径）を最適化しフェーズリミットが-90degとなるように設計した。エネルギー変換効率は実測値で70%程度得られており、25KWの定格ビーム出力の場合の加速管の熱負荷は10KW程度にとどまっている。加速管は水冷で冷却するが、適応冷却方式（特許出願中）により、重いビームローディングに伴う熱負荷の不均一を補正して、大出力時でも正確な位相特性が確保できるようにしている。

#### 5. インジェクタ部

電子銃はカソードとしてCPI EIMAC Y-845を

使用したTRIODE GUNであり、ビームダイナミクス改善のため工業用リニアックとしては高い140KVの加速電圧とした。電子銃の電極形状は、E-GUNにより、運用電流の400mAで最適の光学特性が得られるように最適化した。出力ビーム電流はFEED-BACK制御ループを設けて安定化して、電流安定度は長期間の運転時にも±1%以下が達成できており、クライストロン出力の安定化とともにビームエネルギーの安定性の確保に役立っている。

電子銃の後段にノーズリエントラント型の1空洞定在波型プリバンチャを装備している。このプリバンチャの給電は大幅なオーバカップル ( $\beta = 30$ )となるように設計しており、ビームローディングの影響が無く、安定してインジェクションが行える。

## 6. ビームダイナミクス

ビームダイナミクスの最適化設計はPARMELAにより行った。プリバンチャ/加速管でのビーム透過率は計算値90.2%に対して実測値90%で設計通り良好な特性が達成できている。偏向マグネットのエネルギーリット部に蛍光板を挿入してモニタしたエネルギー幅特性を図-3に示す。ほぼ全電流が10MeV±0.5MeV内に入っており、該当位置での分析無し状態でビーム径がほぼ15φである点を考慮すれば半値幅は0.4MeV以下と思われる。工業用リニアックとしては極めて良好な特性である。なお本特性は、電子銃のトリガタイミングの調整によりINITIAL BEAM LOADING EFFECTを補正した後に測定したものである。電子銃出力電流値400mAに対して加速管出力電流は360mA、エネルギー分析後のビーム電流は340mAで総合的なビーム透過効率は85%にも達しており、低ビームロスのシステムとなっている。

本システムはビームローディングが重く、Reactive Phase Distortionが発生する。これについては、加速RF周波数を約200KHz上昇させることにより補正している。[1]

## 7. Beam Break Up(BBU)検討

本リニアックは、従来のシステムに比べ13.5μsecとパルス幅が長い他、ビーム電流も400mAと比較的大きく、ビームエネルギーの低い加速管上流部でRegenerative BBU(R-BBU)が発生する恐れがあった。このため、バンチャ空洞部及びレギュラ部の計15空洞分をMAFIAによりモデル化・解析して、BBUの原因となるダイポールモードを全て検討した。該当部分には10個のダイポールモードが存在する。このうちほぼ光速のビームと結合するπモードで、結合領域で負の群速度を持っていて、相互作用領域が長くシャントインピーダンスの高い3種のHEM11モード(Mode No.3, No.4, No.5)を選定し、このそれぞれについてP.B.Wilson [2][3]の方法によりR-BBU開始電流を求めた結果は以下の通りである。概算値ではあるが、400mAの運転に対して十分なマージンが得られている。

Mode	Dipole Mode Freq.	Starting Current
No.3	4213.2MHz	3.25 A
No.4	4226.8MHz	2.10 A
No.5	4234.8MHz	3.09 A

## 8. クライストロンモジュレータ

クライストロンモジュレータは、通常のラインタイプモジュレータである。平均出力が大きいため、サイラトロンとしては現在入手可能な範囲で最大の平均電流容量を持つEEV社CX-1720MNを使用している。また、PPSが高いためコマンド充電方式を採用してサイラトロンのリカバリタイムを確実に確保するとともに、PFNキャパシタに高電圧がかかる時間を最短化して長寿命が得られるように配慮している。パルストランスの2次側にはクライストロン巻線とともに電子銃用の高圧巻線も備えて、電子銃に140KVの高圧パルスを供給している。モジュレータは、PFN部及び放電部までを含む電源盤部とパルストランス及びクライストロンから成るクライストロンタンク部に分かれる。このうちクライストロンタンク部は放射線遮蔽壁内に収納し、管理区域外にある電源盤部との間を同軸高圧パルスケーブルで接続している。クライストロンとしては仏トムソン社のTH-2154を使用している。

## 9. システム制御

本システムは、工業用のPLC(Programmable Logic Controller)により、加速器起動シーケンスから運転中のビームエネルギー、ビームパワーの安定化、運転諸元のモニタ及びインタロック動作、停止シーケンス、異常発生時の再起動シーケンスまで全てを全自動化している。加速器起動及び停止はボタン1個の操作で完了し、スタンバイ状態から定格出力まで約1分で到達する。モニタ機能は加速器制御盤上のLCDタッチセンスパネルに集約されており、グラフィクス画面上で対話式にリニアックの動作状況を全てモニタすることができる。更にリニアックシステムは上位の工場統合管理システムに接続されており、統合監視室のEWS画面上で完全なりモート運転ができる。

## 10. 結論

国産初で世界でも最高出力のSバンド電子滅菌リニアックシステムは、高度に統合化された全自動滅菌工場システムの主要構成品として2台が納入され、ホギ社筑波滅菌センターで順調に稼働中である。

## 11. 謝辞

本開発に当たってBBU解析を中心とした理論面でSLACのDr.P.B.Wilson, Dr.J.W.Wangに支援を頂いた。日本高周波(株)の篠原己抜社長、馬場斉氏を始めとする方々にはクライストロンモジュレータ及び立体回路の開発で多大な支援を頂いた。また、株式会社ホギメディカル殿には、本リニアックの開発の機会を与えて頂くとともに10MeV電子滅菌の国内における先駆者として種々御指導を頂いた。ここに厚くお礼を申し上げます。

## 12. 参考文献

- [1] S.Arai et al. "Detuning effect in a traveling-wave accelerator structure due to beam loading", Particle Accelerators, 1984 vol.15, pp.99-114
- [2] P.B.Wilson, HEPL Report 297, June, 1963
- [3] P.M.Lapostolle & A.L.Septier, "Linear Accelerators", North-Holland Pub. Company, 1970, pp.190-192

図-1 リニアックシステムの概略構成図

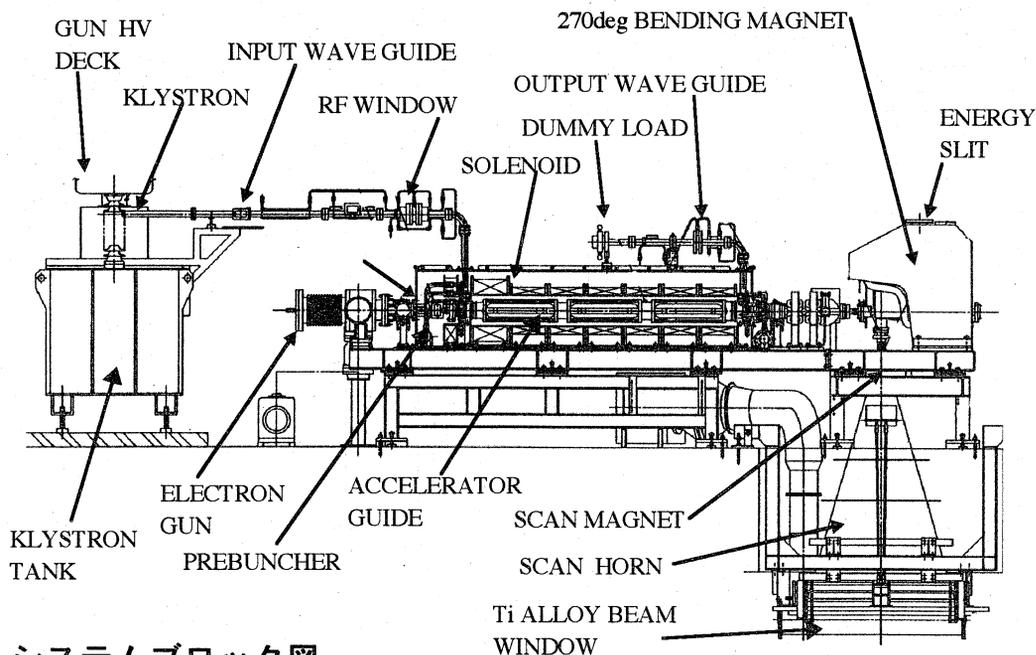
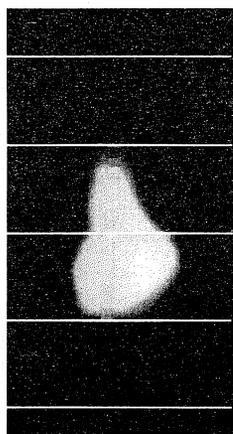
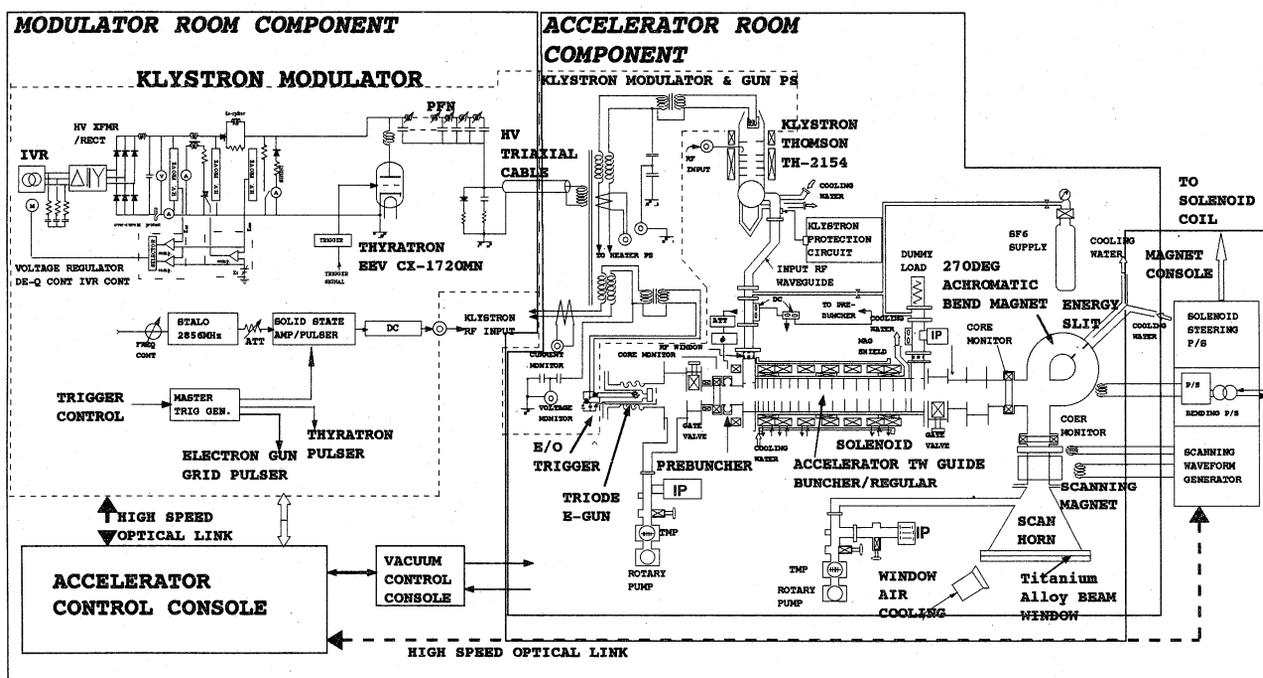


図-2 システムブロック図



1.0MeV

0.5MeV

0 (10MeV)

-0.5MeV

-1.0MeV

図-3 エネルギー幅特性

Energy analyzed beam profile at the energy slit position on Desmarquest AF995R plate.