

DESIGN OF MULTI-BEAM KLYSTRON FOR COMPACT X-BAND LINAC

Tomohiko Yamamoto^{1,A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}, Shuji Matsumoto^{B)}

^{A)} Nuclear Professional School, School of Engineering, the University of Tokyo

2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, 319-1188

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

We develop portable X-band Linac X-ray source for non-destructive testing (NDT) and medical application at Nuclear Professional School, the University of Tokyo. We adopt a magnetron for 950 keV X-band Linac NDT X-ray source. However magnetron is self-excited oscillator, so excited frequency is unstable. Therefore we start to design multi-beam klystron (MBK) for more stable RF Source. In this paper, we describe the design status of X-band MBK at the University of Tokyo.

小型X-band Linacのためのマルチビームクライストロンの設計検討

1. はじめに

現在東京大学大学院工学系研究科原子力専攻において試験を行っている非破壊検査用9.4 GHz X-band Linacに使用している高周波源はマグネトロンである。このマグネトロンはレーダー用に用いられるものであり、出力も小さく小型であるため装置全体を可搬型にできるメリットがある。しかし、自励発振器であるマグネトロンは発振状態が不安定になることがあり、X線強度が不安定になる可能性がある。そこで、安定かつ小型な高周波源としてマルチビームクライストロンの採用を検討している。マルチビームクライストロンは複数の電子銃を使うため、高出力であっても低電圧の陰極で高周波を誘起できる。

我々は、将来的な産業・医療用小型加速器のために2 MWクラスのマルチビームクライストロンの設計を開始した。本発表では、設計現状の報告を行う。

2. マグネトロン

我々が950 keV X-band Linacに使用している高周波源は東芝電子管デバイス製の9M85と呼ばれる気象用レーダーに用いられているものである。最大出力250 kWでパルス幅2 μ s、陽極電圧27 kV、中心周波数9.4 GHzとなっている。Fig.1に950 keV X-band Linacに用いられているマグネトロンの写真を示す。



Fig.1 9M85 Magnetron (Manufactured by TETD)

マグネトロンは磁電管とも呼ばれ電場と磁場の相互作用によって振動をおこす高周波電子管である。マグネトロンの内部構造をFig.2に示す。中心部に陰極、外側に導体の陽極を配した構造で、Fig.2で示すように複数のRF空洞をもつ真空管である。RF空洞はすべて同じ共振周波数をもつ空洞共振器である。中心部の陰極内にあるヒータ温度上昇に伴い、別電子が放出される。しかし、磁場により軌道が曲げられることから作用空間内を回転運動することになる。ここで、熱電子は高周波電場による速度変調を受けることになる。回転運動をしている電子のうち減速電場を受けたものだけが作用区間に存在することになる。作用空間内にとどまっている電子の塊を電子極といい、その電子極は、陽極電圧と磁場により一定周期で回転運動しながら、同一周期を持つ空洞共振器の高周波電場にエネルギーを与え続けるので、振動が持続することになる。マグネトロンは小型であり取扱が容易である。発振効率は70 %程度に達するものもあるが、自励発振器であるため、周波数の安定度が悪くなりやすい。可搬型のLinac X線源のRF源として適している大きさであるが、発振の不安定性はそのままビーム不安定性に影響することになる。

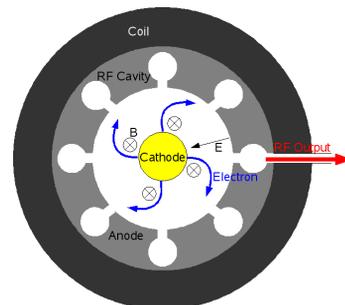


Fig.2 Schematic View of Magnetron

¹ E-mail: tomohiko@utnl.jp

3. クライストロン

クライストロンは速度変調管であり、高エネルギー分野で使用される加速器に一般的に使われている高周波源である。Fig.3に東大原子力専攻内で研究開発を進めている11.424 GHz X-band Linac コンプトン散乱X線源に採用している50 MWクライストロンの写真を示す。



Fig.3 X-band (11.424 GHz) 50 MW Klystron

クライストロンは種となるRFを入れてやることにより電子銃から発生した電子ビームが速度変調を受けることによりバンチングし、バンチングされた電子ビームが作る電磁場によりRF出力を行う(See Fig.4)。クライストロンは増幅度が大きく、高出力である。また、入力RFによって発振周波数が決まるため、周波数安定度は高い。しかし、基本的に高エネルギー加速器に用いられるので高出力な大型化しやすく、高価になり、可搬型Linac X線源に向きである。

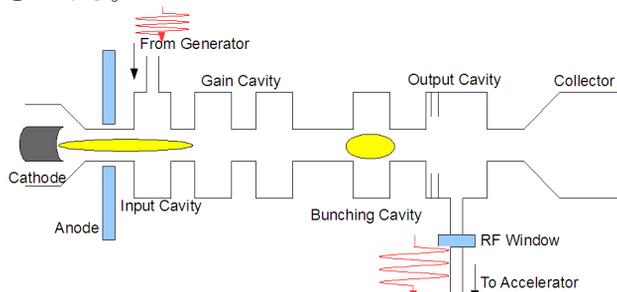


Fig.4 Schematic View of Klystron

4. マルチビームクライストロン

通常のクライストロンで高出力を目指すのであればもっともわかりやすい方法が電子銃電圧を高くすることである。しかし、その場合電源が大きくなったり、オイルタンクが必要になったりする。そこで電子銃電圧を下げ高出力を目指す場合であれば、電流を増やす必要があるがPerveanceが大きくなり効率が下がる。さらに、陰極が大きくなりコストがかかってしまう。

マルチビームクライストロンは複数の電子銃とドリフトチューブを使用し、最終的にビーム集束させてRF出力させるクライストロンである。複数の

電子銃を採用することで1つ1つの初期電子銃電圧を下げるができる。それにより電源が小型化・オイルタンク不要になり数MW程度であれば非常に小型なRF源として使用できる可能性がある。また、低電圧化により個々のPerveanceも下げることができ高効率化できる。Table.1に3つのRF源の比較表を示す。

Table.1 Comparison of RF Sources

	Magnetron	Klystron	MBK
Type	Self-excited	VM	VM
Cathode	1	1	Multi
Voltage	Low	High	Low
Stability	Unstable	Stable	Stable
Power	Low	High	Low-High
Size	Small	Big	Small

5. MBK設計

以上を踏まえて我々は今現在、小型X-band Linac X線源用に出力2 MW程度のマルチビームクライストロンの設計を行っている。仕様をTable.2に示す。

Table.2 Parameter of MBK

Peak Power	2 MW (250 kW x 8)
Beam Voltage	50 kV
Beam Current	13 A
Beam Lets	8 lets
Cavities	6 cavities/tube
Length	130 mm

我々は周波数9.3 GHzとし、今現在開発を進めている3.95 MeV X-band Linac NDT X線源や6-10 MeV程度の医療用Linac X線源への適用を考えている。電子銃電圧は50 kVとしてある。これは電源を大型化するのを避けるためと既往の電源で対応できることからコストを下げるができると考えられるからである。30 kV程度であると電流を稼ぐために陰極サイズが大きくなる可能性もある。電圧を上げすぎるとオイルタンクの採用や新規小型電源の開発も必要になり研究開発の段階では非常にコストがかかってしまう。それゆえ、現状の電源で対応でき実績のある50 kVとした。マルチビームクライストロンの3次元イメージをFig.5に示す。

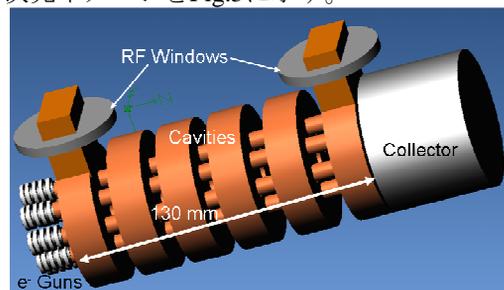


Fig.5 3D View of Multi Beam Klystron

我々は、MAGICを用いて2次元形状の空洞計算を行っている。一例をFig.6に示す。Fig.6はRF出力空洞である。2次元形状はシングルビームのクライストロンと構造設計は変わらないが、ビームの集束の

ための磁場などの3次元計算が必要になる。現在は、2次元形状の最適化と3次元磁場計算を行っているところである。

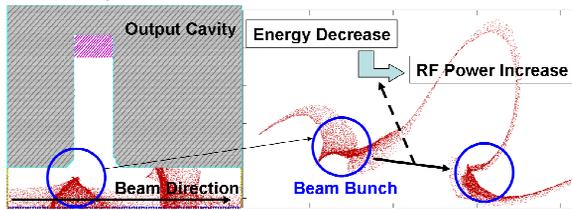


Fig.6 MAGIC Result

6. まとめと今後の計画

小型X-band Linacに適用するマルチビームクライストロンの設計を行っている。今現在開発設計を進めている3.95 MeV X-band Linac X線非破壊検査装置や医療用6 MeV X-band Linac X線源への適用を目指し、RF出力を2 MWとした。初期電圧50 kV ビーム数8本、空洞数6とし長さを130 mm程度と考えている。

今後は、3次元形状計算や磁場計算などを行って形状最適化する。今年度内に詳細設計を完了し、製作を開始したいと考えている。

参考文献

- [1] A. Larionov, V. Teryaev et al., "Design of Multi-Beam Klystron in X-Band" Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002)
- [2] 福田茂樹、"高周波電力源の考え方とその設計(1)" OHO'06 (2006)
- [3] 松本修二、"MAGICによるクライストロンシミュレーション" OHO'99 (1999)
- [4] 福田茂樹、"クライストロンとその周辺" OHO'88 (1988)
- [5] 道園真一郎、"高周波源" OHO'02 (2002)