

ELECTRON BEAM EVALUATION OF 9.4GHz X-BAND LINAC FOR PORTABLE X-RAY NDT SYSTEM¹

Takuya Natsui^{2,A)}, Yamamoto Tomohiko^{A)}, Fumito Sakamoto^{A)}, Akira Sakumi^{A)}, Noritake Yusa^{A)}, Yoshihiro Taniguchi^{A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Eiji Tanabe^{C)}, Naoki Nakamura^{C)}, Seiki Morita^{D)}, Masashi Yamamoto^{E)}

^{A)} UTNS: Nuclear Professional School, School of Engineering, University of Tokyo
2-22 Shirakata - Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki, JAPAN 319-1188

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

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

^{C)} Accuthera Inc.

2-7-6 Kurigi, Asaoku, Kawasaki-city, Kanagawa, 215-0033 JAPAN

^{D)} E-CUBE Corp.

3-21-14 Hanabatake, Tsukuba-city, Ibaraki, 300-3261 JAPAN

^{E)} Akita National College of Technology

1-1, Iijima-Bunkyo-chou, Akita-city, Akita, 011-8511 JAPAN

Abstract

We are developing a compact X-ray source for nondestructive testing (NDT) system. We aim to develop a portable X-ray NDT system by 950keV X-band linac to realize on-site inspection. We use a low power (250kW) magnetron as an RF source for compactness of whole system. By using the low power magnetron, we can use small magnetron power supply and cooling system. Additionally, the system has X-band linac and it has small spot size of electron beam. Our final goal of X-ray spot size is less than 1mm.

We have designed the linac structure of the π mode at low energy parts and the $\pi/2$ mode at high energy parts by using calculation codes. It was finished to measure resonant frequency and electromagnetic field of the linac. And the result of measurement agrees with calculation data. The components of this system were completed and they are installed in the Nuclear Professional School, the University of Tokyo. We are carrying out electron beam accelerate testing.

可搬型X線非破壊検査装置用9.4GHz X-band Linacの電子ビーム評価

1. はじめに

非破壊検査は、工業産業分野やエネルギープラントなどに広く用いられており、その方法としては、超音波を使ったもの、電磁誘導や放射線を用いるものなどがある。特にX線を用いた非破壊検査は医療で用いられるX線撮影と同様の原理を工業用製品の検査に適用したものである。

我々は、250kW MagnetronをRF源とする9.4GHz X-band Linacを用いたX線非破壊検査装置の開発を行っている。本装置では低エネルギーのMagnetronを使用することで、電源、冷却装置などシステム全体を小型化している。さらに、発生する電子ビームエネルギーを950keVとすることで、放射線障害防止法に基づく放射線管理区域の設置が必要なく持ち運び可能な装置となる。図1に本装置の完成予想図を示す。

従来のS-bandの加速周波数を使ったLinacでは装置

全体が大きくなり、さらにビームのスポットサイズも大きくなる。我々の装置はX-bandを使っているのでビームスポットサイズ向上が見込まれ、最終的に1mm以下のスポットサイズを目指して開発を行っている。

本装置のLinacは当初 $\pi/2$ -modeのみで設計していた

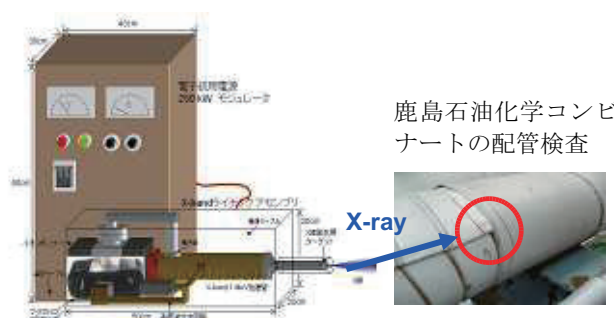


図1 装置完成予想図とその応用

¹ 本研究は、KEK大学等連携支援事業および、経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業として行われている

² E-mail: n-takuya@utnl.jp

が、シミュレーションの結果、低エネルギー部に問題があり電子ビームを安定に加速できないことが分かった。これを解決するため、加速管の低エネルギー部には π -mode空洞を採用し、最終的に950keVの電子ビームが得られる形状を設計することができた。

本装置はKEKにて加速管を作製し、現在は東大にて電子ビーム発生試験を行っている。

2. システム概要

本システムはマグネトロン・サーキュレータ・パルスモジュレータ・20kV熱電子銃・X-band Linacなどからなり、これら全体をスーツケース2つ分のサイズまで小さくすることを最終目標としている。

図2にシステムの概略を示す。本装置はパルスマ

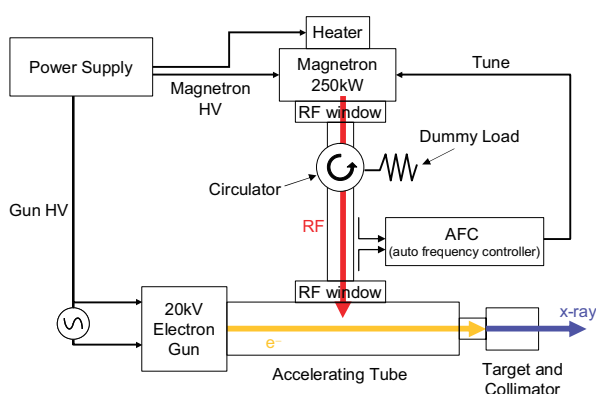


図2 システム概略

グネトロンで9.4GHzのRFを発生させ3ポートサーキュレータを通し定在波型APS空洞LinacにRFを投入する。サーキュレータに取り付けているダミーロードはウォーターロードを採用している。電子源は20kVの熱電子銃を使い、400mAの電子ビームをパルスで発生させる。パルス幅は電子ビーム、RFともに2 μ secである。電子銃から発生された電子ビームを加速管で950keVまで加速し、金属ターゲットに当て制動放射X線を発生させる。繰り返しは500ppsである。

この装置ではRF源にマグネトロンを採用している。マグネトロンは自励発振であるため温度などの条件によって周波数が変化する可能性がある。このような周波数変化を補償してやるためにAFC(Auto Frequency Controller)を搭載している。

3. 加速管の設計・製作

我々のシステムでは、マグネトロンからのRFパワーが250kWしかなく、効率よく電子を加速させるLinac構造が求められた。加速管の設計はSUPERFISHおよびGPTを使って行い、加速管構造は $\pi/2$ モード定在波型のAPS (Alternative Periodic Structure)空洞を採用した。しかしながら、シミュレーションの結果、 $\pi/2$ モードの空洞だけを使っても950keVまではビームを加速できないということが

わかった。

これは、電子ビームが低速度の領域で加速位相に電子が乗らないということに起因していることがわかった。これは、電子の初期速度は $\beta = 0.27$ (ここで $\beta = c/v$ c :光速, v :電子速度)であるのに対して、空洞は $\beta = 0.4$ の空洞から始まっているためである。本来ならもっと狭い空洞を作製し、電子の速度と空洞の波長を合わせてやらなければならないが、X-bandの空洞が非常に小さな空洞になってしまうため工作限界により $\pi/2$ モードでは $\beta = 0.4$ が限界であった。

そこで、加速管の低速度領域では π モード空洞を採用することにした。 π モード空洞は結合空洞がない分だけ1セルを小さく作ることができる。このようにして、最初の3セルは π モード空洞で、後半は $\pi/2$ モード空洞という加速管を設計することができた。

この加速管のGPTによる電子加速シミュレーションでは、約20%の電子が800keV以上に加速されるという結果が得られた。このシミュレーション結果を図3に示す。

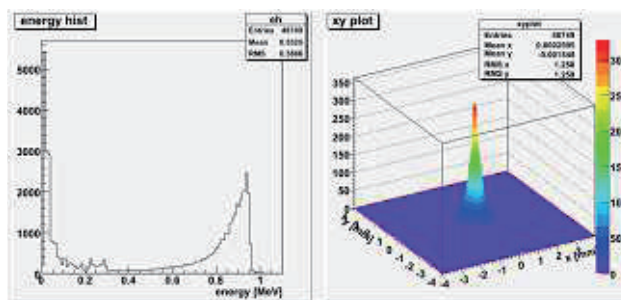


図3 GPTシミュレーション結果

このように、加速管の設計ができたので、加速空洞をKEKにて作製した。作製された加速管は共振周波数、Q値、軸上電場を測定し、設計値と一致していることを確かめた。図4に軸上電場分布の計算値とビードプル法にて測定した値を、表1に共振周波数とQ値の計算値と測定値を示す。

また、図5は電子銃とRF窓を溶接した加速管の写真である。

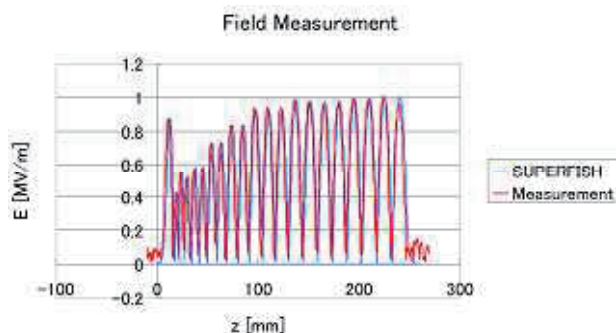


図4 SUPERFISHによる計算値とビードプル法によって測定された加速管軸上電場分布

表1 加速管特性の計算値と測定値

	共振周波数[MHz]	Q値
計算値	9400.1	6609
測定値	9399.86	6618.1



図5 電子銃とRF窓を溶接した加速管写真

4. ビーム加速試験

4.1 ビームライン

すべてのコンポーネントが完成したので東大に機器を搬入し、現在ビーム加速試験を行っている。図6は現在構築しているビーム電流測定ラインである。今後は、ビーム電流のほかにエネルギースペクトル、スポットサイズ、エミッタンスも測定したいと考えているので、そのつど、ビームラインを組みなおしてビーム測定を行っていく予定である。

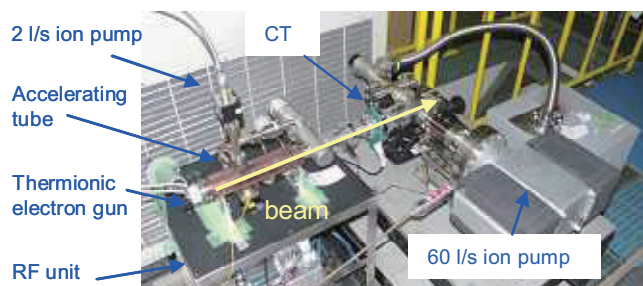


図6 ビーム測定ライン

4.2 マグネトロン発振試験

ビーム加速試験を行うためにまず、マグネトロンからのRF発振試験を行った。しかし、マグネトロンの異常発振が観測され、定格250kWのRFパワーが得られなかった。しかもこれは、負荷としてダミーロードを接続したときには見られず、3ポートサーキュレータと加速管を接続したときに観測される。

図7にダミーロードを負荷としたときのオシロスコープ観測波形を、図8にサーキュレータ・加速管を負荷にした場合の観測波形を示す。

図8でRF波形が乱れているのがわかるが、これは負荷からの反射がマグネトロン異常発振を引き起

こす位相にある可能性が高いので、反射の位相調整を行い、再度RF出力試験を行う予定である。

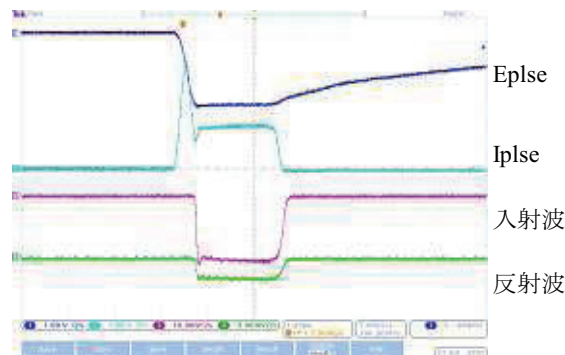


図7 ダミーロードを負荷とした場合のマグネトロン出力波形 (出力250kW)

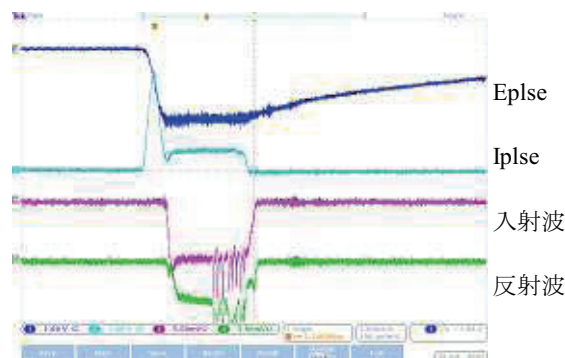


図8 サーキュレータと加速管を負荷とした場合のマグネトロン出力波形 (出力180kW)

5. まとめ

本研究では、9.4GHz X-band Linac を用いた非破壊検査用小型X線源の開発を行っている。この装置に用いている加速管はon-axisカップリングの定在波型のもので π モードと $\pi/2$ モードを結合した形になっている。加速管はKEKにて作製され、現在は東大にてビーム加速試験を行っている。しかし、マグネトロン異常発振の現象が見られるので、この現象を解決した後、ビーム電流・エネルギー・スポットサイズ・エミッタンスを測定予定である。

参考文献

- [1] T. Yamamoto, et al., “X線非破壊検査装置のためのXバンド950keV加速器の開発” *Proc. of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, August 2-4, 2006, Sendai, Japan* pp.245
- [2] N. Takuya, et al., “Experiment of X-ray source by 9.4GHz X-band Linac for Nondestructive Testing System” *Proc. of PAC07 June25-29, 2007, albuquerque, New Mexico, THPMN031*