

# DEVELOPMENT OF 950 KEV X-BAND LINAC FOR NONDESTRUCTIVE INSPECTION

Tomohiko YAMAMOTO<sup>\*A)</sup>, Katsuhiro DOBASHI<sup>A)</sup>, Takuya NATSUI<sup>A)</sup>, Mitsuru UESAKA<sup>†A)</sup>,  
Tshiyasu HIGO<sup>B)</sup>, Shigeki FUKUDA<sup>B)</sup>, Mitsuo AKEMOTO<sup>B)</sup>,  
Eiji TANABE<sup>C)</sup>, Seiki MORITA<sup>D)</sup>, Masashi YAMAMOTO<sup>E)</sup>

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

B) KEK: High Energy Accelerator Research Organization  
1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801 JAPAN

C) Accuthera Inc.  
2-7-6, Kuriki, Asou-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 215-0033 JAPAN

D) E-CUBE Corp.  
1077-158, Ohaza-Hino, Hino-shi, Tokyo, 191-0000 JAPAN

E) Akita National College of Technology  
1-1, Iijima-Bunkyo-chou, Akita-shi, Akita, 011-8511 JAPAN

## Abstract

We are developing an X-ray source for nondestructive inspection (NDI). In this system, 9.4 GHz X-band Linac and 250 kW Magnetron are adopted. The previous 1 MeV X-band machines use 1 MW Magnetron, where a large part of RF power is dissipated as heat at the Linac. We have chosen the 250 kW Magnetron so that the heat loss is reduced. This fact enables compactness and low price. 20 kV thermoionic electron gun, accelerating structure, RF system and control system are under design. The whole system is to be constructed in 2006.

## X線非破壊検査装置のためのXバンド 950keV 加速器の開発

### 1. 概要

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。それゆえ、エンジンなどの内部損傷の検査や原子炉圧力容器溶接部の検査などに使用できる。

本研究で開発を進めている線形加速器(Linac)を用いたX線非破壊検査装置は従来のS-bandを用いるの

ではなく、9.4 GHzのX-bandを用いることにしている。また、RF源としてKlystronではなく、低ピークパワー(250kW)のMagnetronを使用し装置の小型化を図る[1, 2, 3]。

本システムは電子エネルギー950 keVに特化した低パワーのMagnetronをRF源とすることで電源の小型化、さらには装置全体の小型化をはかることができ、図1のような、検査のために特別な工場などに製品を持ち込むことなく、プラント内で検査を行えることを目標としている。

以上のように、性能、外形寸法および価格において従来製品よりも優れた、工業製品としての競争力のある装置の実現を視野に入れている。

### 2. 装置

本非破壊検査装置は、図2の概略図で示されるように、X線源本体(X線ヘッド)、電源、冷却水装置で構成される。

パルストランス、RF源(Magnetron)、電子銃を含む加速管は1つの筐体内にコンパクトに配置され、外部のパルス電源(PLC制御部含む)および冷却水供給装置より、電力と冷却水が供給される。また、導波管は窒素加圧を予定している。

電子銃はMagnetronと同一の二次巻き線により駆動され、カソード半径1.8 mm程度の熱陰極ダイオード型を用い、20 kV、400 mAで動作させる。ギア950 keV、120 mAでパルス幅1.6  $\mu$ sを目標としている。動作電圧を20kVとしたのは、絶縁碍子が大型

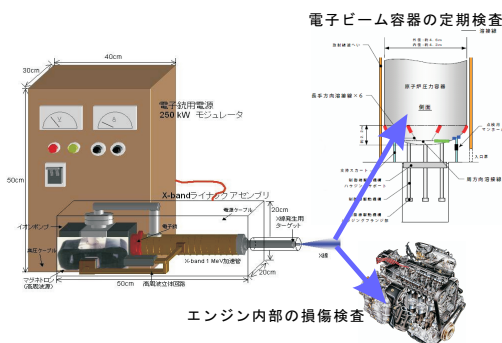


図 1: 非破壊検査装置概念図

\* E-mail: tomohiko@utnl.jp

† E-mail: uesaka@utnl.jp

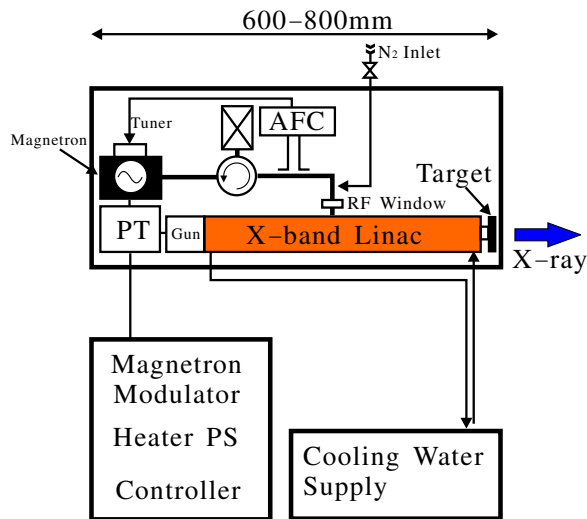


図 2: 装置全体概略図

化するのを嫌ったものであり、小型の加速管に見合う大きさを目指している。

加速管は  $\pi/2$  モードのアキシャルカップリング定在波型で 30 cm 以下である。また、導波管は既製品であるが、乾燥窒素加圧として耐圧を上げる。従って、加速管手前には RF 窓が設置される。コストダウンやメンテナンス性向上のため、導波管の通常空気での運転も考えている。

これにより、発生する電子ビームはビームサイズ 0.6 mm 以下、エネルギー 950 keV、120 mA でパルス幅 1.6  $\mu$ s を目標としている。

X 線スポットサイズは従来の S-band Linac を用いた非破壊検査装置が 3 mm 程度であることを踏まえ、1 mm 程度を目標とし、さらに小さな損傷等を検査できるように考えている。従来製品は 3mm のスポットを得るためにソレノイドコイルを加速管に設置しているが、装置が大型化高価格化してしまう。本装置では電子ビームをできる限り小さいサイズで発生させ、そのまま加速することにより、ソレノイドコイルなしで極小スポットサイズを実現したいと考えている。

## 2.1 RF 源

RF 源には、気象用レーダーなどに用いられている、9.4GHz、250kW のパルス Magnetron (東芝製 9M85) のチューナーを変更し、より高精度での発振周波数調整ができるようにしたものを (E3570SPL) 使用する (図 3)。

陰極引加電圧 25kV、運転パルス幅 3  $\mu$ s、最大デューティーは 0.0015 となっている。Magnetron 単体での試験は、メーカー工場での納入試験のあと、KEK にて電源等の設備を借用しての低繰り返し (50pps) での安定性試験を行っている (図 4)。現在のところ大幅な周波数ドリフトなどはみられず、後述の AFC と組み合わせると加速管の駆動に十分使用できると考えている。

Magnetron を含めた RF システムには、AFC (Auto Frequency Controller) を導入することにより周波数の

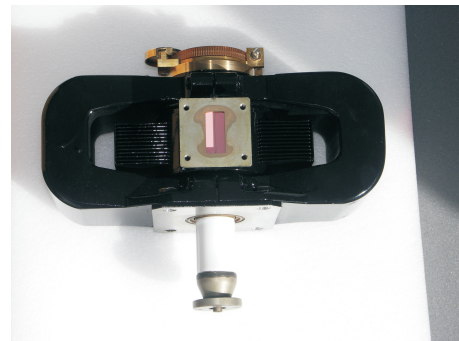


図 3: Magnetron



図 4: Magnetron 動作試験図

ずれをフィードバックさせ、安定化をはかる予定である。これは Magnetron を用いた医療用加速器では一般的な技術であり、Magnetron 発振周波数がチューニング範囲から外れなければ問題なくビームを加速できると考えている。

工業製品としての競争力の向上のためには性能および価格だけでなくシステム全体の小型化も非常に重要であるが、特にパルス電源は大型となりがちであり、注意深い設計が必要である。本装置はピークパワーはさほど高くないが、高繰り返し (500pps 程度) での運転が要求される。スイッチング素子には IGBT などの固体素子を用い、人の手で輸送可能な程度まで小型軽量化したい。現在、低価格で実現できる従来型の PFN 方式及びダイレクトスイッチ型の 2 種類の方法について同時に設計検討している。高圧充電電源は外国製のインバータ電源を採用する予定である。

PFN 型については早急に製作し、Magnetron の高繰り返し運転試験や AFC の動作試験を進めたい。

## 2.2 電子銃

電子銃はカソード半径 1.8 mm 程度の熱陰極ダイオード型を用い、20 kV、400 mA で動作させる。前述の通り、加速管と比較しても十分小型である必要がある。非破壊検査装置のスペックより要求されている性能を満たすため、今年度より新規に電子銃の設計を開始した。カソード回りの電気設計は D-GUN を用いて行った (図 5)。現在、メーカーでの機械設計および熱設計までが終り、製作に入っている。

しかしながら、現在の設計では高精度のアライン

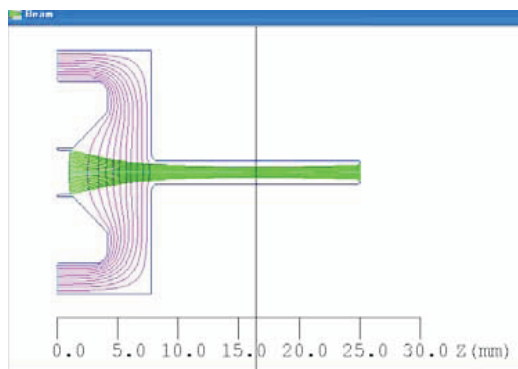


図 5: 電子銃

メント要求を満たすために構造が複雑化し価格が非常に高くなっていることが問題となっている。海外製品では数千ドルで似たスペックのものが量産されており、価格競争に対応できる電子銃の開発が課題となっている。

### 2.3 加速管

加速管の設計は電磁場解析コード SUPERFISH を用いて行った。加速管は周波数 9.4 GHz で  $\pi/2$  モード、電子ビームエネルギーを 20 keV ( $\beta = 0.27$ ) から 950 keV ( $\beta = 0.94$ ) まで加速するように設計をする。セルの種類は  $\beta$  で、0.4 のハーフセル、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、0.94 を使用することとし、カップリングセルの幅を 2 mm、ディスクの幅を 1.5 mm、アイリスの半径を 4 mm に固定した。図 6 に加速管の全体図を示す。

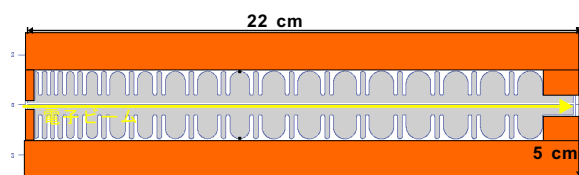


図 6: 加速管構造図

現在は、設計した加速管におけるビーム加速シミュレーションを PARMELA を用いて進めている。特に重要な課題は、加速後の電子ビームエネルギーおよびスポットサイズである。これらは、電子銃直後にあるハーフセルでのビーム運動により大きく影響を受ける。ハーフセルにてアンダーパンチ気味になってしまうとその後の加速にも影響が出てしまう。電子銃よりも加速管の設計製作が先行してしまったため、シミュレーションの初期電子ビームは平行ビームを仮定している。現在のところ、若干の RF パワーの増強(またはビーム負荷減少)により 950keV までのビーム加速は可能であると判断している。ビームスポットについては広がる傾向がみられており、収束磁石(ソレノイド)の導入も検討しなければならないかも知れない。今後、電子銃で発生したビームの運動を考慮した初期値による、より現実に近い条件でのシミュレーションを行っていく予定である。

### 3. X線評価試験

本研究の開発目標の一つに電子ビームスポットサイズの極小化による X 線透過像の分解能の向上がある。目標の分解能を得るために、ビームスポットを小さくするだけでなく、X 線コリメーターなども使用して X 線源サイズを小さくするようにする。

X 線発生の確認および強度測定は、NaI(Tl)シンチレータや電離箱サーベイメータなどで簡易的に行う。

2次元画像の取得は、オフラインでの評価を考慮しており、X 線フィルムやイメージングプレートを使用して、画像解析により画像分解能の性能評価を行う計画である。

CT 画像取得などを考慮し、オンラインでの透視画像取得可視化のための装置検討も行っている。

### 4. まとめ

我々は、X 線非破壊検査装置の小型化、高性能化を実現するために 9.4 GHz X-band Linac と 250 kW の Magnetron を採用し、設計及び製作を進めている。また RF 源としての Magnetron の性能評価を KEK にて進めながら、Magnetron 用パルス電源、AFCなどを順次製作し試験を行っていく。2006 年度中にはビーム加速および X 線発生/評価まで行いたい。

また、本研究結果を土台として、さらに高エネルギーの医療(癌治療)用 X 線源のための加速器の開発も視野に入れ、4MeV 以上の加速管の開発なども進めていく。

### 5. 謝辞

本研究は高エネルギー加速器研究機構の平成 17 年度および平成 18 年度の加速器科学支援事業における大学等連携支援事業(治療用小型加速器の開発のための要素技術研究)によって進められている。本研究を進めるにあたり、KEK の高山健氏、吉田光宏氏、高富俊和氏、工藤昇氏には Magnetron テストや加速管設計についてのアドバイスをいただいた。ここに深く感謝を申し上げる。

### 参考文献

- [1] T. Yamamoto et al., *Proc. of 8th Symposium on ARTA 2006, Tokyo, JAPAN* (2006) pp.21-24
- [2] T. Yamamoto et al., *Proc. of EPAC 2006, Edinburgh, UK* (2006) WEPCH182 (in press)
- [3] Andrey V. Mishin, *Proc. of 2005 PAC, Knoxville, Tennessee* (2005) pp.240-244
- [4] T. Nishikawa et al., *The Review of Scientific Instruments* Volume 37, Number 5 May 1966 pp.652-661
- [5] D.E.Nagle et al., *The Review of Scientific Instruments* Volume 38, Number 11 November 1967 pp.1583-1587
- [6] E.A.Knapp et al., *The Review of Scientific Instruments* Volume 39, Number 7 July 1968 pp.979-991
- [7] C.J.Karzmark et al., *Medical Electron Accelerators* McGraw-Hill 1992