

オンサイト非破壊検査用可搬型 950keV X バンドライナック X 線源

Portable 950keV X-band Linac X-ray Source for On-site NDT

東大院工	夏井拓也, 山本智彦, 坂本文人, 谷口善洋, 田口博基, 遊佐訓孝, 上坂充, Takuya Natsui, Tomohiko Yamamoto, Fumito Sakamoto, Yoshihiro Taniguchi, Hiroki Taguchi
KEK	肥後寿泰, 福田茂樹, 明本光生, 吉田光宏, Toshiyasu Higo, Shigeki Fukuda, Mitsuo Akemoto, Mitsuhiro Yoshida
アキュセラ	山本昌志, 中村直樹, 田辺英二, Masashi Yamamoto, Naoki Nakamura, Eiji Tanabe
イーキューブ	森田成基, Seiki Morita

We are developing a portable 950 keV X-band (9.4GHz) linac (liner accelerator) X-ray source for on-site nondestructive testing. In the field of linac, recently, an acceleration method with X-band (8-12 GHz) RF attracts attention. If we use the X-band RF in stead of conventional S-band (2-4 GHz) RF, a high electric field can be realized. Consequently, the downsizing of the whole system can be expected. So far, S-band (2856 MHz) linacs are used for the NDT. However, large RF power that need big RF source and power supply is necessary in S-band system. To realize an on-site diagnostics, we adopted a compact X-band 9.4 GHz magnetron for RF generation device. Its RF power is 250 kW. The whole device such as power supply and cooling device can be miniaturized by using low power RF. This system can be used for on-site NDT of erosion of metal pipes. Additionally, since linac generates pulse X-ray, condition based maintenance of an impeller of a pump is also available by synchronized transmitted snapshot.

Keywords: NDT, X-ray radiography, Linac, Portable X-ray source

1. 緒言

原子力・火力発電所の寿命延長に伴い、そのメンテナンスが重要な課題となっている。原子力発電所では原子力圧力容器および炉内構造物の亀裂や保温材付配管の減肉検査、石油化学コンビナートでは保温材下の配管外部腐食検査などには検査に伴う莫大な費用が発生している。

そこで、我々はライナックを使った可搬型 X 線非破壊検査装置を開発している。ライナックは X 線管よりも高エネルギーの電子ビームを発生するので高エネルギーの X 線での検査が可能になる。このため、原子炉圧力容器や金属配管などの金属部分の検査が可能になる。

ライナックの分野では、近年、電子加速に X バンド周波数帯の高周波(Radio Frequency : RF)を使用する加速方式に注目が集まっている。X バンド周波数帯の RF を使用した場合、従来多く使われた S バンド周波数帯による電子加速よりも高電場が得られ、加速効率の向上や装置の小型化が見込まれる。このため、リニアコ

ライダー用に開発された X バンドライナック技術の医療応用・産業応用などに期待が高まっている。X バンドライナックは小型で従来の X 線管よりも高エネルギーの X 線発生が可能であるため、可搬型非破壊検査装置の適用範囲を大きく広げられると期待されている。

2. 装置概要

本研究で開発している非破壊検査用可搬型 950 keV 9.4GHz X バンドライナック X 線源は、工業製品の非破壊検査用の X 線源であり、従来のライナックシステムよりも格段に小型化した可搬型装置を目指している。具体的には、加速管の周波数を X ライナック(9.4 GHz)にすることで加速管自体を小型化し、またマイクロ波源に低電力 (250 kW) のマグネトロンを使用することで、冷却装置や電源も小型にする。この装置の完成予想図を図 1 に示す。

本装置では、高周波を使いライナックで電子ビームを加速し、ビームを金属ターゲットに当て制動放射 X 線を発生させる。高周波加速を用いているため、静電場

連絡先: 〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22 原子力研究施設上坂研究室 Tel: 029-287-8413 e-mail: n-takuya@nuclear.jp

加速である X 線管よりも高いエネルギーの X 線を発生することができる。

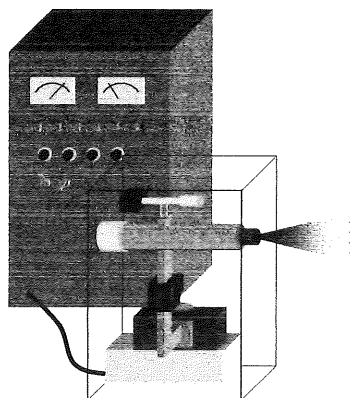


図1 装置完成予想図

図2にシステムの体系図を示す。本システムはマグネトロン、サーキュレータ、高圧電源、パルスモジュレータ、20 kV 熱電子銃、X バンドライナックなどからなり、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。

本装置はパルスマグネトロンを使用して 9.4 GHz の高周波を発生させサーキュレータを通し定在波型 APS 空洞のライナックに高周波を投入する。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する。電子源は 20 kV の熱電子銃を使い、400 mA の電子ビームをパルスで発生させる。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。発生 X 線のパルス幅は約 2 μsec である。繰り返しは 500 pps であり、X 線の線量は 0.2 Gy/min@1m を見込んでいる。空間分解能は 1 mm を目指している。この装置では高周波源にマグネトロンを採用しているが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

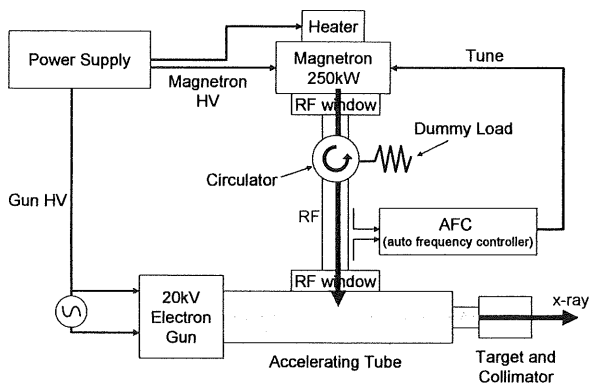


図2 システム概略

が変化する可能性がある。このような周波数変化を補償するために AFC(Automatic Frequency Controller)を搭載している。

3. 加速管の設計・製作

本研究のシステムでは、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ライナック構造が求められた。加速管の設計は計算コード SUPERFISH および GPT(General Particle Tracer)を使い、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判明した。これは、電子の初期速度は $\beta=0.27$ (ここで $\beta=v/c$, 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。本来ならより狭い空洞を作製し、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 バンド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、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。

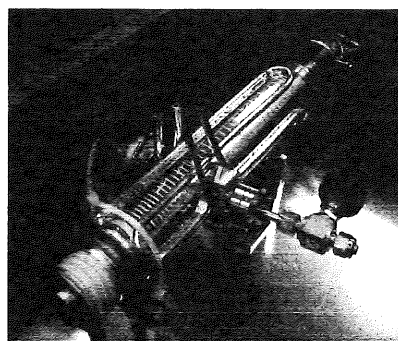


図3 電子銃と RF 窓を溶接した加速管写真

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%(80 mA)の電子が 800 keV 以上に加速され、そのスポットサイズは 2 mm 程であるという結果が得られた。

このように、加速管の設計を行い、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が確かめられている。図 3 は電子銃と RF 窓を溶接して完成した加速管の写真である。

4. 電子ビーム測定試験

電子ビーム測定は、ビーム電流、ビームエネルギースペクトル、スポットサイズについて測定を行った。

ビーム電流測定では、加速管から出射されたビームをファラデーカップで受けて電流を測定した。その結果、約 60mA のビーム電流であることが確かめられた。このときのオシロスコープ波形を図 4 に示す。

ビーム電流波形を測定したときに図 4 の加速電流波形のようなビーム振動を観測した。これは、通常の加速管では起こらないことであり、現在原因を究明中である。

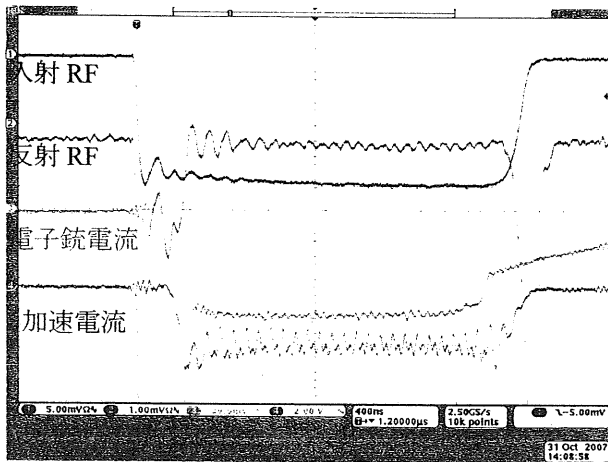


図 4 ビーム電流波形

電子ビームエネルギースペクトル測定試験は、電子ビームに磁場を印加し運動エネルギーによる曲率の違いに起因する軌道の差異により電子ビームのエネルギースペクトルを測定する方法を用いた。これは、加速管から出てきたビームを電磁石を用いて曲げ、ビームライン下流で電流ピックアップ用の金属端子により特定のエネルギーを持ったビーム電流を検出する。このときの測定体系図を図 5 に示す。

エネルギースペクトルの測定結果を図 6 に示す。測定では、目標とする 950 keV 付近にピークが観測できたので、エネルギーとしてはほぼ仕様を満たしていると言える。ただし、電流量はシミュレーション結果よ

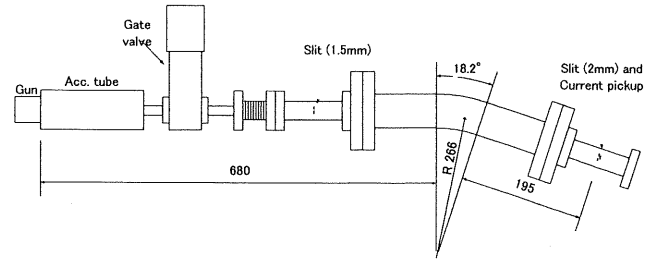


図 5 ビームエネルギースペクトル測定体

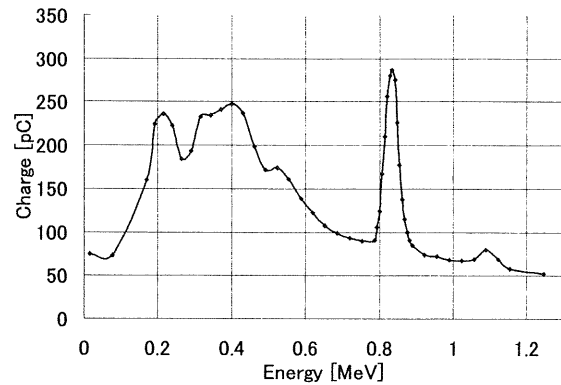


図 6 ビームエネルギースペクトル測定結果

りも少ないことが分かり、また、高エネルギービームでもビーム振動が観測された。このため、X 線撮影では光子数を稼ぐため照射時間が長くしないと画像が得られない可能性があることが分かった。

X 線撮影を行う上で、分解能を左右する重要なパラメータである電子ビームスポットサイズの測定も行った。これは、スクリーンモニターの中のアルミナ蛍光板にビームを当てその発光によりビームサイズを測定するというものである。

スクリーンモニターにはアルミナ蛍光板が取り付けられており、それを上下に動かすことによりビームをアルミナ蛍光板に当ててその発光を CCD カメラで撮影し、ビームサイズを確認する。ビームライン上流側スクリーンモニターは加速管出口から 220 mm の位置に、下流側のスクリーンモニターは 460 mm の位置に設置した。

この測定よりビームサイズは FWHM で上流側 2.46 mm, 下流側 3.74 mm であった。この結果から、加速管出口でのビームサイズを試算すると、1.10 mm 以上、1.95 mm 以下になる。これより、シミュレーション結果のスポットサイズ 2 mm は達成されていると考えている。

電子ビーム測定においては、電流量は低いものの設

計値である 950keV 付近のビームエネルギーが得られていることが分かった。さらに、スポットサイズもシミュレーションと一致する 2mm 程度であることも確認できた。目標とするスポットサイズ 1mm は今後追加する集束マグネットにより達成されるであろうと考えている。

5. X線発生および撮影試験

ビーム測定試験を終えたあとに、ビーム測定用のビームラインを取り外し、加速管に金属ターゲットを取り付けた。これで、X線を照射できる体系にすることができた。

まず、X線線量測定を行った。測定は、X線線量測定チェンバーをX線発生点から 50 cm の点におき、パルス繰り返しを 5 pps にして測定を行った。その結果、0.3 mGy/min の X線が観測された。これを定格の 500 pps に換算すると 30mGy/min であり、発生点から 1 m の場合は、7.5 mGy/min@1m である。目標としている値は 0.2 Gy/min@1m であるので、測定された X線量はかなり低いといえる。これは、ビーム電流が少ないためであると考えられる。

次に、X線スポットサイズ測定を行った。これは、ピンホール法を使い光源サイズを求める方法で、1mm 厚の鉛板に直径 0.5mm の穴を開けて X線撮影を行い、撮影できた X線の像から光源サイズを判断した。その結果、X線スポットサイズは 2.5mm と測定できた。

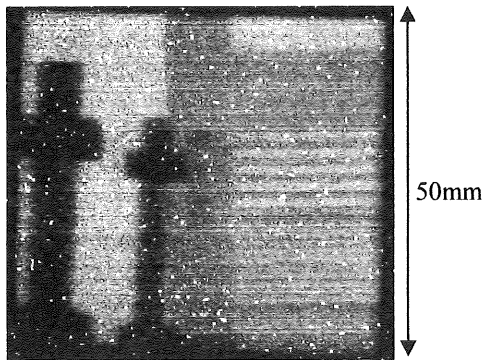


図7 シンチレータを用いた画像取得
SUS ボルトと X線テストチャート

X線撮影試験は、シンチレータを使った撮影とイメージングプレートを使った撮影を行った。シンチレータを用いたイメージングは CaF₂ シンチレータを冷却 CCD カメラで撮影した。この画像を図7に示す。また、

イメージングプレートを使った撮影結果を図8に示す。

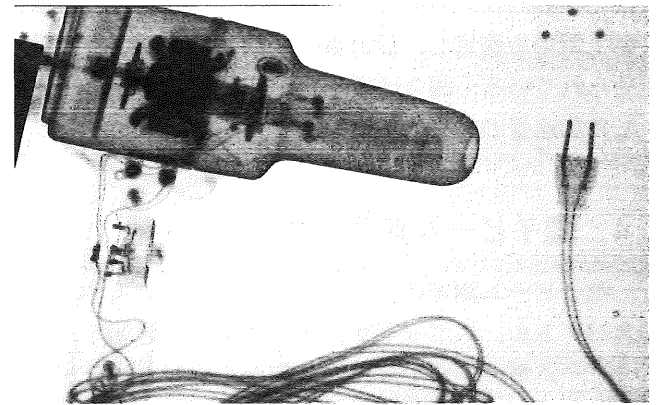


図8 イメージングプレートを使った撮影
(ドライヤー)

6. 結論

本研究では、9.4 GHz Xバンドライナックを用いた非破壊検査用小型 X線源の開発を行い、電子ビーム測定を終えて、X線撮影試験を行った。本装置は、電子ビーム測定の結果、加速電流量が設計値に達成しておらず、X線線量も目標値には達成していない。ただし、電子ビームは 950 keV に達しているため X線撮影試験では、積算時間を多くとることで画像取得に成功している。今後は、電流量改善のために加速管の再設計を行い、2号機を作成する予定である。

本装置が完成すれば高エネルギー X線を用いたオンサイト非破壊検査が、原子炉圧力容器や石油化学コンビナート配管で行えるようになり、検査の信頼性向上、短時間化が可能になる。

- [1] T. Yamamoto, et al., *Eighth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2007)*, Kitakyushu, 2007, 21.6
- [2] T. Natsui, et al., *Proc. of PAC07 June25-29, 2007*, Albuquerque, New Mexico, THPMN031
- [3] 夏井拓也, 他, 物理学会 2007 年秋季大会, 21pZG-12, 北海道, 2007 年 9 月 21 日-24 日
- [4] 山本智彦, 他, 「可搬型 X-band Linac X線源を用いた X線撮像試験」日本原子力学会 2007 年秋の年会, 北九州国際会議場他, 2007 年 9 月 27 日-29 日