

# 950keV ライナック X 線源によるその場検査用 X 線測定システム

## Development of 960keV X-Band Linac for Portable Nondestructive Testing System

(独)日本原子力研究開発機構 山本 智彦 Tomohiko YAMAMOTO Member  
東京大学原子力専攻 藤原 健 Takeshi FUJIWARA Member  
東京大学原子力専攻 上坂 充 Mitsuru UESAKA Member  
東京大学原子力専攻 平井 俊輔 Shunsuke HIRAI Student Member

We have been developed 9.4 GHz X-Band linac and 250kW magnetron for X-ray nondestructive testing system for Condition Based Maintenance (CBM). Our linac's energy is 950 keV, which fits to Japanese regulation to take them to outside of radiation controlled area. This small portable linac enables to diagnosis the moving facility, such as bearing in Nuclear Power Plants.

**Keywords:** X-Band, Linac, Nondestructive, CBM, X-ray

### 1. 緒言

原子力発電所の安全確保・稼働率向上のために状態監視保全、すなわちプラントを稼働させながら検査評価する保全手法が重要となってきた。発電所の内部で最も故障事象の多い機器としてポンプなどの回転機器、部品としてはベアリングが挙げられる。現在ベアリングの余寿命評価は振動計によって加速度信号発生頻度の上昇カーブをフィッティングし、破壊までの余寿命を推測する手法が一般的である。しかし機器や運転条件によって結果のバラツキがあり、重大な被害を起こす可能性がある。本研究においては、可搬型 X-band Linac X 線源によるベアリングのリアルタイム撮像による回転機器非停止静止画像取得と装置の安定化の向上に取り組み、放射線とその他の検査手法とを融合させた新しいベアリング余寿命評価法の構築を目指す。

### 2. Linac を用いた X 線非破壊検査装置

#### 2.1 装置概要

本研究で使用する 9.4 GHz X-band Linac は最大電子エネルギー 950 keV であり、放射線障害防止法に規定されている管理区域の設置が必要なく局所遮蔽のみで使用可能である。加速管本体の写真を Fig.1 に示す[1][2]。装置の主要パラメータを Table.1 に示す。エネルギーはほぼ設計どおりであるが、ビーム電流が少ない。それによって線量率も設計値より少なくなっている。

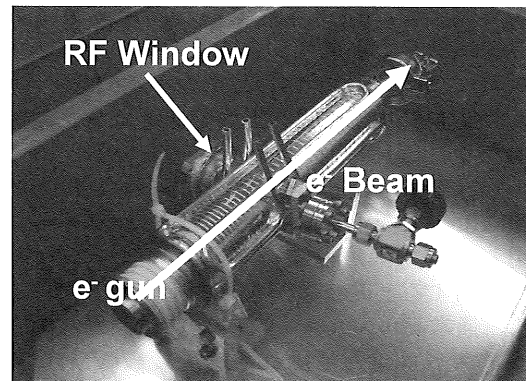


Fig.1 X-band Linac 試験体系図

この原因としては、加速管中で電子ビームが振動し、電流が不安定になっていることが挙げられる。今後装置開発を進めていく上で、加速管の構造を変え、より効率の良いものに設計をしない必要があるが、本研究においては将来的にこのような小型加速器を使った非破壊検査装置としての適用を目指した応用についての研究を行った。

Table.1 装置パラメータ

	Design	Experiment
Energy	950 keV	~ 950 keV
Beam Current	200 mA	60 mA
Dose rate @ 1 m	200 mGy/min	7.5 mGy/min

#### 2.2 装置分割案

可搬型 X 線源を現場で使用するためには現場からの要請として 1 ユニット 30 kg 程度が理想である。しかし、加速管やマグネトロンのユニットは導波管やイオンポンプなどが組み込まれており、70 kg 程度となってしまふ。そこで、加速管+イオンポンプ

連絡先: 藤原健, 〒319-1188 茨城県那珂郡東海村  
白方白根 2-22, 東京大学大原子力専攻  
Tel : 029-287-8495, E-mail: fujiwara@nuclear.jp

などの真空を保持しなくてはならない部分と導波管+マグネトロンなどの部分に分割することを考えている。接合部は RF 窓が加速管に溶接されているため、単純なねじ止めでもかまわない。出力も小さいので導波管を真空にする必要がないため、組み込み作業も短時間でできると考えている。Fig.2 に分割案のブロック図を示す。

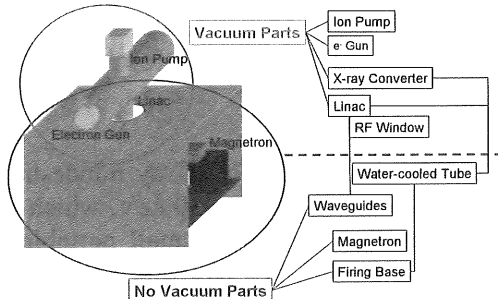


Fig.2 X線源部分割案

### 2.3 高周波源安定化

本実験装置に採用されている高周波源は気象用レーダーなどに使用される250 kWのマグネトロンである。このマグネトロンは重量が7.5 kgと小型で、最大250 kWと比較的低出力であるため、電源も小型になり、「可搬型」として適しているといえる。しかし、自励発振器であるマグネトロンは周波数が時間によって変化しやすい。実際、マグネトロンを使用している医療器ではロボットアームなどによって稼動すると周波数がずれ、不安定となることがある。通常高エネルギー加速器には高周波源としてクライストロンと呼ばれる速度変調(VM)管を採用するが、高い周波数安定度に対して初期電圧が高いなど装置が大型化しやすい。そこで、小型かつ安定な高周波源として低電圧の熱陰極を複数使用することで電源などを小型にできるマルチビームクライストロン(Multi-Beam Klystron, MBK)の設計を行っている。MBKはその名の通り、複数のビームにより高周波を誘起させるクライストロンである[3]。これにより通常のクライストロンに比べて初期電圧が低く安定な高周波源とすることができる。Table.2 にマグネトロン・クライストロン・MBKの比較表を示す。

Table.2 高周波源比較表

	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

MBKの出力としては2 MW程度を考えており、適用するLinacのエネルギーは本装置よりも高エネルギーな3.95 MeVや6 MeV程度を考えている。こ

れにより非破壊検査ならびに医療用X線源としても小型かつ安定な線源として使用できると期待できる。ビーム計算はMAGICと呼ばれる2次元PICコードを使用している。今現在は空洞の最適化ならびに3次元構造の設計を行っており、博士論文では1つのクライストロンシステムの設計を完成させたい。Fig.3にMBKにおける1ビーム空洞図とMAGICによるビーム計算例を示す。MBKの空洞は通常のクライストロンと同様に1空洞のビーム計算を基に複数のビーム空洞を束ねる形で計算が可能である。よって、1ビーム空洞のビーム計算を十分に行う必要がある。

### 2.3 装置性能評価[4]

加速管から生成されるX線の性能評価として識別能・分解能評価を行った。識別能はある厚さに対してどの程度までの厚さの違いが判別できるかで評価する。識別能はある厚さ $t$ の試験体にJIS Z2306規格で定められたHole透過度計の厚さ $t_c$ の比として評価した。このとき識別能 $D$ は

$$D = \frac{t_c}{t} \quad (1)$$

で表される。測定は鉄製の試験体の厚さ $t$ を変化させ、透過度計のホールが視認できる最薄の透過度計厚さ $t_c$ を測定するという方法で行った。試験体系をFig.4に示す。試験体厚さは同じ厚さの鉄板を重ね合わせることで変化した。また1枚目にはJIS Z2306規格のHole透過度計を貼り付け、フラットパネルディテクターで取得した画像上でHoleが視認できるもっとも薄い透過度計厚さを測定した。

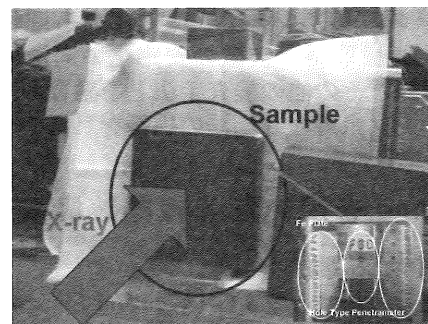


Fig.4 識別能評価試験体系

試験結果をFig.5に示す。水色のラインがX線コリメータのない試験結果・赤色のラインがX線コリメータを挿入した試験結果である。コリメータのありなしに関わらず15 mm以上の厚さにおいては識別能3%程度であることがわかった。コリメータなしの状態では20 mm以上の識別能が悪くなっている原因はビームの広がりなどが関わっていると考えられる。この結果から本試験装置では20 mm程度の鉄板に対して600 μm程度の厚さの差を区別するこ

とができる。

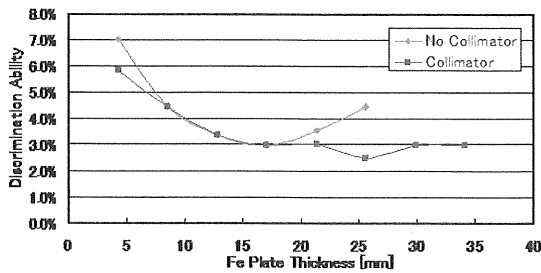


Fig.5 識別能評価試験結果

### 3. X線による回転機器同期静止画撮像試験

Linac から生成される X 線はパルスであるので、回転機器の回転周期と X 線パルスの繰り返し間隔を同期させることで回転機器が回転中であっても静止画として取得できることになる。このことを実証するために以下のステップで試験を行ってきた。

- (1) PC ファンと IP による原理実証試験[8]
- (2) 送風機と FPD による原理実証試験
- (3) ベアリングを用いた実証試験

(1)によって回転機と同期が取れていれば撮影可能であることを実証し、(2)によって PC 上で状態を監視できる FPD とも同期させることによりオンラインで視認可能であることを実証した。(3)では実際に現場で使用されている玉軸受けを使用し、(1)(2)の内輪との同期手法と異なり、転動体に同期させた画像取得を行った。これにより 1 つずつの転動体が静止しているように見える。試験で使用した玉軸受けの場合、転動体である玉が周方向の自転だけでなく 3 次元的に回転するため、玉軸受けの場合の転動体損傷を静止画取得することは事実上困難であるが、ころ軸受けなどであればこの手法は有意義である。試験では転動体の公転周期を電磁信号としてピックアップするため、電磁センサーを使用し同期信号とした。試験体系を Fig.6 に試験結果を Fig.7 に示す[9]。結果を見るとたしかに、転動体 1 つ 1 つを区別して視認できるが、非回転時に比べて像がぼけていることが分かる。これは EM センサーに起因するジッターが原因であると考えられる。しかし、この手法であれば、外から視認できない転動体であっても X 線透過画像としては静止画像として取得できるということがわかった。

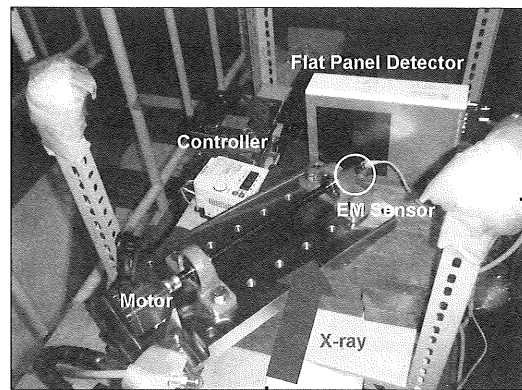


Fig.6 ベアリング同期画像取得試験体系

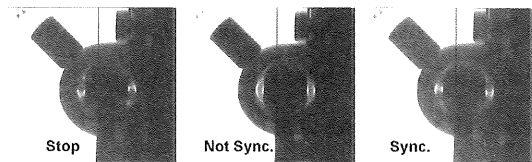


Fig.7 EM センサーを用いた画像取得結果

### 4. 結論・今後の研究方針

Linac から生成される X 線を用いた原子力状態監視保全応用について要素実験を行った。今後はパルス X 線によるベアリングのリアルタイム監視・静止画取得を成功させ、さらなる精度向上のための同期信号系の構築を行い、現場に適用できる装置の配置などの検討を行う。また、東京大学大学院工学系研究科上坂研究室で行われている中性子ビーム、放射光による残留応力測定によって従来の余寿命評価に定量的な機軸を導入し、新しい評価法の構築を目指す。本研究によってベアリング余寿命評価の新技术を構築し、現場への適用を目指す。

### 参考文献

- [1] T. Yamamoto et al., Proc. of IVEC2007, IEEE Electron Devices Society, 07EX1526, pp.443-444, (2007)
- [2] 山本智彦他、日本原子力学会 関東・甲越支部若手研究者討論会 (2007)
- [3] A. Larionov, V. Teryaev et al., "Design of Multi-Beam Klystron in X-Band"
- [4] 山本智彦他、日本保全学会第 6 回学術講演会要旨 (2009)
- [5] M. Uesaka et al. Proc of 7th NDE (2009)
- [6] 上坂充他、日本保全学会第 6 回学術講演会要旨 (2009)
- [7] 清水茂夫、“機械系のための信頼性設計入門” 数理工学社,2006
- [8] T. Yamamoto et al., The American Institute of Physics Conference Proceedings Series, 1009, pp.95-98, (2009)
- [9] 山本智彦他、日本 AEM 学会誌 Vol.17, No.2, pp211-215 (2009)