

可搬型 X バンドライナック X 線源によるベアリングマクロ損傷観察試験

Macro Damage Observation of Bearing using Portable X-band Linac Based X-ray Source

東京大学大学院原子力専攻 山本 智彦 夏井 拓也 李 基羽 森 梓
Tomohiko YAMAMOTO Takuya NATSUI Kiwoo LEE Azusa MORI
平井 俊輔 橋本 英子 上坂 充
Shunsuke HIRAI Eiko HASHIMOTO Mitsuru UESAKA

We are developing X-ray nondestructive testing (NDT) system using with portable X-band linac. This system uses 9.4 GHz X-band linac and 250 kW magnetron. Our system energy is 950 keV for Japanese regulation. Therefore we can use it on-site using local radiation protection. We measured electron beam and X-ray. We have started X-ray imaging test. We will use this system for condition based maintenance of pump-impeller at nuclear plants. The linac based X-ray source can generate pulsed X-ray. Therefore we can get still images without stopping rotation when x-ray repetition rate synchronizes impeller's rotation rate. We are successful in proof of principle using a simple fan and a synchronized circuit. We prepare real-time imaging for conventional pump. In this paper, we will explain the detail of this system and experimental results.

Keywords: X-band Linac, Condition Based Maintenance, X-ray

1. 緒言

原子力発電所などにおける状態監視保全の重要性が高まっている昨今の事情を鑑みて、我々は X-band の可搬型 Linac を用いた X 線源の開発を行っている。我々は、昨年レーザーを用いた同期回路と送風機を用いて回転機を静止させることなく X 線撮像を行い、静止画像を取得することができた。さらなる性能評価のため、X 線による識別能・解像度評価試験、玉軸受けと電磁センサーを使用した転動体に同期した画像取得を行った。また、実際に発電所で使用され損傷があるベアリングの X 線撮像試験も行った。

本発表では、各種試験結果と今後の課題について報告する。

2. X-band Linac 概略

2.1 システム概略

装置は茨城県東海村にある東京大学大学院工学系研究科原子力専攻内のブランケット棟医療用小型来ナック室に設置されている。最大電子ビームエネルギー 950 keV、加速周波数 9.4 GHz の X-band 帯を用いた小型 Linac による X 線源である [1][2]。Fig.1 に試験体系の加速管側写真を示す。

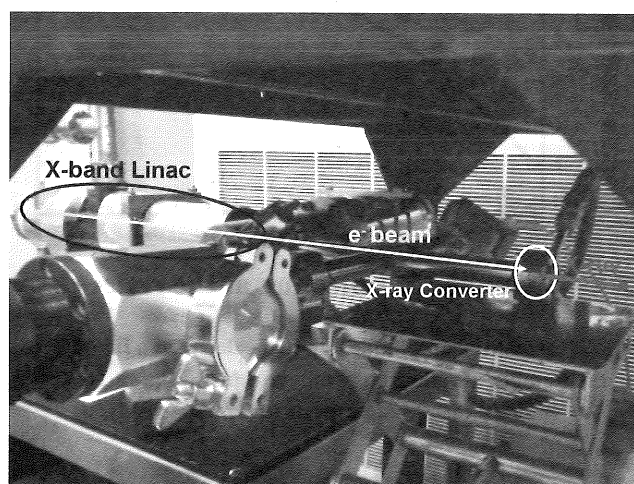


Fig1 Experimental Setup (Linac side)

2.2 高周波源の開発

本装置は高周波源として汎用性の高いレーダー用のマグネトロンを採用している。出力は 250 kW 程度と比較的低出力のため、電源などが小型化でき我々の装置のコンセプトである「可搬型」に適しているものであると言える。しかし、一般的にマグネトロンは自励発振器であるため、周波数が不安定になりやすい。通常の Linac であればクライストロンと呼ばれる速度変調管を使用し、高出力・高効率・高安定度を実現している。しかし、通常のクライストロンは高出力のため、高価・大型である。よって、このような可搬型加速器

連絡先:山本智彦、〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22 東京大学大学院工学系研究科原子力専攻
電話: 029-287-8984、e-mail:tomohiko@nuclear.jp

には不向きである。

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)の設計を開始した。マルチビームクライストロンはその名のとおり、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]。複数のビームは複数の電子銃と空洞により速度変調され高周波を誘起できる。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.1にマグネトロン・クライストロン・マルチビームクライストロンの比較表を示す。

Table.1 Comparison of 3 RF Sources

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

現在、高エネルギー加速器研究機構の RF グループの協力を得て、出力 2 MW 程度のマルチビームクライストロンの設計を開始した。出力 2 MW 程度であれば最大電子エネルギー 4 MeV 程度の Linac に適用できるため、将来的に高エネルギー X 線非破壊検査装置への適用が期待できる。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いる。Fig.2 に MAGIC による空洞計算の 1 例を示す。

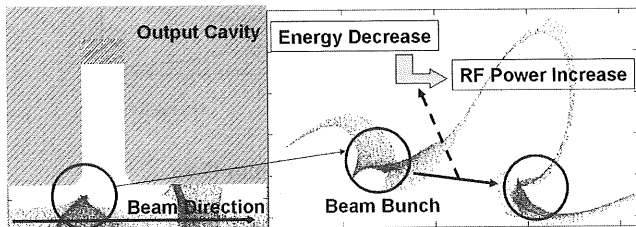


Fig.2 Klystron Beam Simulation by MAGIC

3. X 線撮像実験

3.1 識別能評価試験

X 線透過装置の性能として識別能は重要である。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.3 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させた。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。

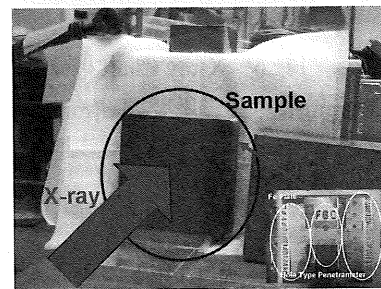


Fig.3 Experimental Setup of Discrimination Ability

試験結果を Fig.4 に示す。この結果の通り、試験体厚さが 17 mm 程度のとき 3% 程度の識別能をもつことが分かる。よって、17 mm の鉄板に対して 500 μ m 程度が識別できることになる。これより薄い場合 X 線透過力が大きく、識別能が下がると考えられる。しかし、厚くなった場合でも識別能が下がっている。通常であれば、高エネルギー側の X 線のみが検出器に検出されるため、識別能が上がってもいいはずである。しかし、検出器の感度が高エネルギー側がないので識別能が下がったと考えられる。

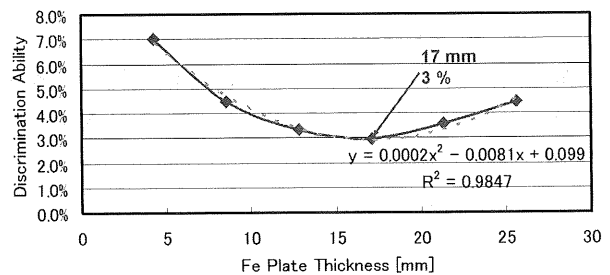


Fig.4 Discrimination Ability

3.2 分解能試験

ベアリングの損傷を評価するためには、損傷の厚さ方

向情報だけでなく、1つ1つを明確に区別できるという情報も必要である。そのため、分解能の評価を Fig.5 に示す X 線チャートを用いて行った。X 線チャートは鉛製で JIS Z4917 規格のものであり、スリットの大きさとスリット間隔が等しく作られており、その大きさが増えているものである。

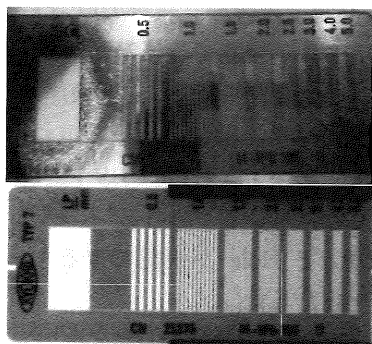


Fig.5 X-ray Chart

分解能 R [LP/mm] はスリット間隔 d [mm] を用いると

$$R = \frac{1}{2d} \quad (2)$$

で表される。分解能の評価は Fig.6 のような試験体系で行い、チャートと検出器の距離を変化させることで分解能変化を測定した。

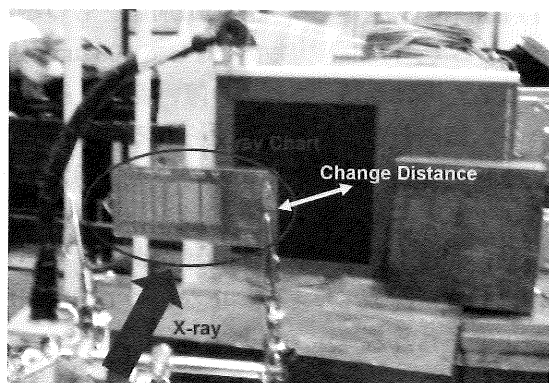


Fig. 6 Experimental Setup of Resolution

試験結果の一例としてチャートと検出器の距離を 100 mm としたものを Fig.7 に示す。Fig.7 は X 線透過画像から画像コントラストのデータをスリットの変化に合わせて取得し、そのコントラスト強度変化をグラフにしたものである。Line Pair の数字が大きくなるほどつまりスリット間隔が小さくなるほど、コントラストの差がなくなり、スリットの区別が難しくなっていることが分かる。

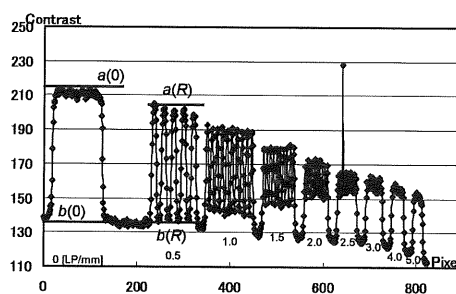


Fig.7 Result of 100 mm Data

さらに、分解能を評価する指標としてレスポンス関数である MTF (Modulation Transfer Function) を導入する。これは X 線チャートを用いて Line Pair (LP) が視認する方法により求めることができる。MTF は

$$MTF = \frac{a(R) - b(R)}{a(0) - b(0)} \quad (3)$$

で表される。これは、0 [LP/mm] のコントラスト差を基準に R [LP/mm] のコントラスト差の比を取ったものである。Fig.7 の結果を用いて各 Line Pair に対して MTF を計算し、グラフ化したものが Fig.8 である。この結果から試験対象物と検出器が 100 mm 離れている際の分解能 R は 2.5~3.0 [LP/mm] 程度であるとわかる。これを(2)からスリット幅を求めると 166~200 μm 程度の分解能を有することになる。分解能を上げるため、現在 X 線コリメータを挿入して試験を行っている。

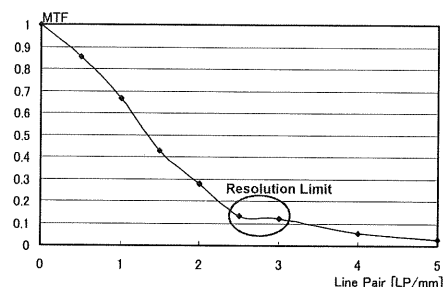


Fig.8 MTF of 100 mm Data

3.3 X 線リアルタイム撮影試験

昨年度の日本保全学会の研究において、我々は可搬型 Linac と同期回路による回転機のリアルタイム撮影で静止画像が取得できるという原理実証を行った[4]。これまでの実証試験においては試験体として PC ファン・送風機を採用したが、今回の実験においては実際に使われている玉軸受けを使用する。玉軸受けは内輪

と転動体の回転数が違うため、どちらに同期させたいかによって方法が異なる。内輪に同期させる場合であれば従来の方式であるレーザー光を用いた手法で十分である。しかし、転動体に同期させる場合は転動体の公転周期に合わせる必要がある。そのために IIU で開発された「電磁郎」で採用されている電磁センサーを使用して同期信号を取得し、X 線同期画像撮影を行った。試験体系を Fig.9 に結果を Fig.10 に示す。転動体を区別できるが、若干のジッターが存在し、転動体輪郭部がぼやけている。このジッターを軽減するための同期信号取得法を検討する必要がある。

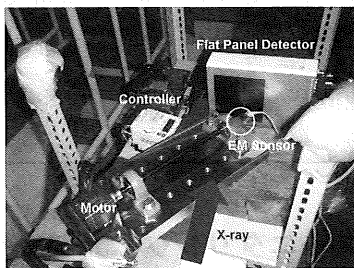


Fig.9 Real-Time Imaging Setup using EM Sensor

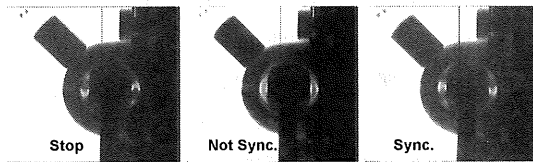


Fig. 10 Results of Real-Time Imaging

3.4 損傷ベアリング撮像試験

中部電力株式会社からお借りした損傷ベアリングを X 線により撮像した。ベアリング厚さは 120 mm 程度であり、損傷部分深さはおよそ 500 μm であった。X 線透過画像の目印として鉛製の X 線フィルムマーカーを傷の存在部分の近傍に貼り付けた。Fig.11 に試験結果を示す。損傷の形状までは明確に確認できないが、損傷位置などは把握することができる。

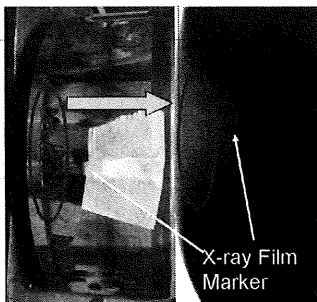


Fig. 11 X-ray Image of Bearing Damage

4. 結言

- 1) 小型加速器を用いた X 線非破壊検査装置の開発を行っている。
- 2) Linac の安定性向上のために、マルチビームクライストロンの設計を行っている。
- 3) 装置性能評価として識別能・分解能評価を行い、鉄板 17 mm に対し識別能 3 %、検査体と検出器間距離 100 mm で分解能 166~200 μm であることがわかった。さらなる性能向上のために X 線コリメータやビーム起動の最適化を行っている。
- 4) ベアリングの転動体に同期させた画像取得に成功したジッターの軽減が課題となる。
- 5) 実際に発電所で使用され、損傷したベアリングの内輪傷の撮影に成功した。
- 6) 将来的には AE や振動法などとともに相互補完しながら状態監視保全へ役立てていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、高周波源開発は高エネルギー加速器研究機構の福田茂樹教授、松本修二助教、吉田光宏助教のご協力を得て行っている。また、ベアリング試験においてトライボテックス株式会社・中部電力株式会社から試験体の貸与を受け多大なご協力を頂いた。リアルタイム撮影用同期信号取得機器として株式会社 IIU で開発されている「電磁郎」に使用されている電磁センサーを利用させていただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 山本智彦、夏井拓也他、“オンサイト非破壊評価用可搬型 950 keV X バンドライナックの開発”、日本保全学会第 4 回学術講演会 産学協同セッション、福井、2007、産学 06
- [2] 夏井拓也、山本智彦他、“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”、日本保全学会第 5 回学術講演会 産学協同セッション、茨城、2008
- [3] A. Larionov, V. Teryaev et al., “Design of Multi-Beam Klystron in X-Band”
- [4] 日本保全学会、“状態監視技術便り” Vol.1, No.1,2009