

改良型 950keV X バンドリニアック X 線源と鉄筋コンクリート構造物その場 透視検査

UPGRADING 950KEV X-BAND LINAC X-RAY SOURCE FOR ON-SITE REINFORCED CONCRETE (RC) STRUCTURE

菅野 浩一^{#,A)}, 草野 譲一^{A)}, 中西 康介^{A)}, 水島 弘二^{A)}, 樋口 哲一^{A)}, エド ヴィリアセニョル^{A)}, 村上 勝^{A)}, 金田 健一^{A)}, 山本 昌志^{B)}, 中村 直樹^{B)}, 伊藤 卓^{B)}, 伊東 正顕^{B)}, 田辺 英二^{A,B)}, 上坂 充^{C)}
K. Kanno^{#,A)}, J. Kusano^{A)}, K. Nakanishi^{A)}, H. Mizushima^{A)}, T. Higuchi^{A)}, Ed Villaseñor^{A)}, M. Murakami^{A)}, K. Kaneta^{A)},
M. Yamamoto^{B)}, N. Nakamura^{B)}, T. Ito^{B)}, M. Ito^{B)}, E. Tanabe^{A,B)}, M. Uesaka^{C)},

^{A)} AET, Inc.

^{B)} Accuthera Inc.

^{C)} University of Tokyo, Nuclear Professional School

Abstract

We report on further developments of a portable X-band linac for non-destructive testing of social infrastructure using high energy X-rays. Based on the successful diagnosis of chemical plant equipment with a first 950keV portable linac system we improved the X-ray dose and flexibility. We reduced the number of accelerator cells from nine to seven and reduced the full length of the accelerator by 22%. We also managed to increase the beam transmission between electron gun and X ray target by about 60% and reduce the leakage radiation by an order of magnitude. We also succeeded in the miniaturization of the X-ray head unit. We completed the non-destructive testing of a steel rod in a reinforced concrete beam of a shipping dock and a PC concrete bridge using the improved linac system. We confirmed higher portability and expanded application range of the new 950keV system. We plan to further improve operability with additional miniaturization and weight reduction in future.

1. はじめに

橋梁やプラント配管など構造物の亀裂や減肉検査、支柱の腐食検査が可能な高エネルギー X 線非破壊検査装置の開発を進めている。950keV 可搬型 X-band リニアックを用いた初号機ではピーク電流 60mA、繰り返し 300pps、パルス幅 2.5 μ s の電子ビーム加速を達成し、化学プラントプロセス塔の設備構造診断に成功している^[1-3]。この X 線画像診断の経験や新たな非破壊検査用途が要求する条件を受け、X-band 加速管の改良を実施した。改良した加速管を組み込んだ非破壊検査装置二号機を用いて、港湾施設のコンクリート梁における現場診断および撤去したコンクリート橋実サンプルの鉄筋診断を行い、所定の成果を上げることができた。

2. 非破壊検査装置と加速管への要求

非破壊検査装置初号機の可搬型 X-band リニアックは、ビーム集束にフォーカスマグネットを用いず RF Focusing を採用してできる限りコンパクトにし、現場で煩雑な作業をしなくて済むようにケーブル等の接続をクイック接合による組み立てに対応するなど、産業応用・社会インフラ点検の現場に適した設計を行っている。しかし、新たに高所・狭あい部での検査に応じることが出来る装置が必要となった。このような制限の多い環境では、検査現場に速やか

に設置し検査を実施でき、かつ、検査装置の設置位置が検査対象物と検出器に対して柔軟に対応できることが必要である。その面からも更なるシステムの小型化と X 線の高出力化が要求される。そこで、加速管を短くしつつ、X 線強度を向上し、漏えい線量を抑制することができるよう加速管を改良し、非破壊検査装置二号機の製作を行った。

3. 加速管の改良設計

初号機よりも小型でありながら高い X 線強度を得るために、加速管のセル数を少なくすることを検討した。初号機の加速管は Half セル 1 つ、Full セル 8 つの合計 9 セルで構成されていたが、改良更新を行った加速管では Full セルを 2 つ減らし、7 セル構造とした。7 セル構造にすれば長さが 12.5cm の加速管が実現し、初号機の加速管長 16cm に対して約 22%短縮することができた。

加速管は初号機に引き続きサイドカップル型を採用した。メインキャビティとサイドキャビティの設計を 3 次元電磁界解析 MW STUDIO^[4]を用いて行った。加速セル数を減らすだけでなく、シャントインピーダンスを高め、ビームアパーチャーでのカップリングを抑えるために第一セルのノーズを追加し、曲率半径とボア半径も変更した。MW STUDIO で最適化されたメインキャビティの寸法を SUPERFISH で再現し、そのマッピングデータと General Particle Tracer(GPT)^[5]を用いて電子銃から

[#]kanno@aetjapan.com

加速管出口までの電子軌道解析を行った。ただし、電子銃は初号機と同じである。Figure1 にその軌道計算結果を示す。計算粒子数は 15,000 個で行った。電子銃電流が 323.4mA に対し、133.9mA の電流が加速管出口で得られ、ビーム透過率が 41% であると推定された。初号機のビーム透過率が 25% であることから、ターゲットへの電子ビーム到達率は 60% 程度向上すると考えられた。このように本改良によりビーム電流の改善が期待できた。

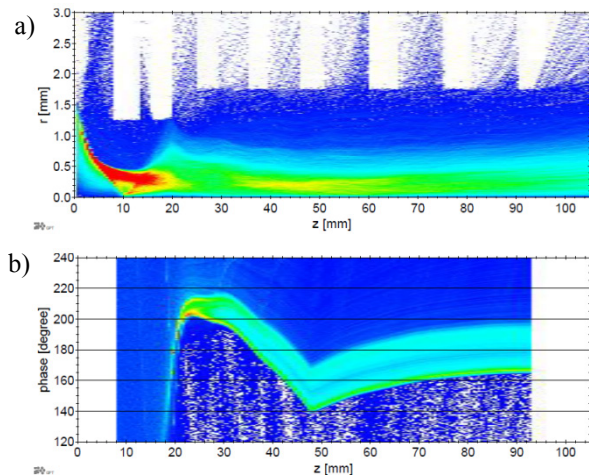


Figure 1: Simulation results of particle tracking for new portable X-band linac. a) Beam profile, b) Phase profile.

透過率が改善されたため、加速管壁に当たる電子は減る。従って、漏えい線量を少なくすることも期待できる。シミュレーションで得られる加速管壁に衝突する電子電流を $I[\mu A]$ 、エネルギーを $E[MeV]$ とすると、1 分当たりの漏えい線量 $R[cGy/min]$ は

$$R = 0.07 \times I \times E^3 \quad (1)$$

となる。これより加速管の漏えい線量を推定すると、加速管出口での電流が 133.9mA の時 0.117mGy/min であることが分かる。また、ビーム透過率が 25% 程度の初号機では漏えい線量が 0.108mGy/min と推定された。従って、初号機でも二号機と同等のビーム電流を得る場合、0.18mGy/min 程度と考えられるので、加速管の改良により漏えい線量の低減も期待できる。

以上の計算より、加速管が 22% 短縮し、ターゲット到達ビーム電流が 60% 増加、さらに加速管内のビームロスによって生じる X 線漏洩も低減できる設計となった。これらに基づき、加速管の製作を行った。

製作した加速管の bead drop 法による電場分布測定結果を Figure2 に示す。測定間隔は 0.5mm で行った。ここでは、測定結果から見積もられたベース周波数値を測定周波数から差し引いた後、二乗スケールファクターを乗じた結果を示している。黄緑線で示した分布は、加速管設計において SUPERFISH による計算から得られた軸上電場強度分布である。第 3 ~ 第 7 セルまで設計電場強度と測定結果は良い一致

をみているが、第 1 セルはやや低めとなり、第 2 セルはやや高めとなった。加速管の仕様を Table 1 に示す。

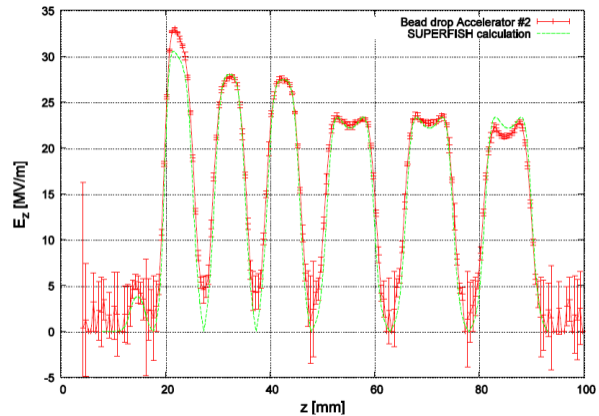


Figure 2: Electric field distribution by bead drop measurements.

Table 1: Specification of X-band Linac

Operating frequency	9.3GHz
RF source	Magnetron
RF power	250kW
Structure type	Side coupled
Length	12.5cm
Accelerating Cell Number	7cell
Shunt Impedance	165 MΩ/m
Q value	7,100
Beam energy	950keV

4. ビーム加速・X線発生

設計・製作した改良型加速管を用いた非破壊検査装置二号機を製作した。Figure3 にその外観を示す。電子ビーム加速と X 線発生試験はこの二号機を動作させることで実施した。Figure 4 にビーム電流波形を示す。電子銃でのエミッション 380mA に対し、140mA のターゲット電流が得られた。ターゲット電流が向上したことで得られる線量も増強していると考えられる。この X 線を利用してサンプル画像の撮像を試みた。PC コンクリート橋脚サンプル (厚さ 15cm) の透視画像を Figure5 に示す。40cm×40cm のフラットパネル検出器 Perkin Elmer XRD0822 にて撮像した。PC コンクリート内のストランドワイヤーとコンクリートサンプル背面に設置した比較用 φ6mm ボルトナットの透視画像が得られていることがわかる。

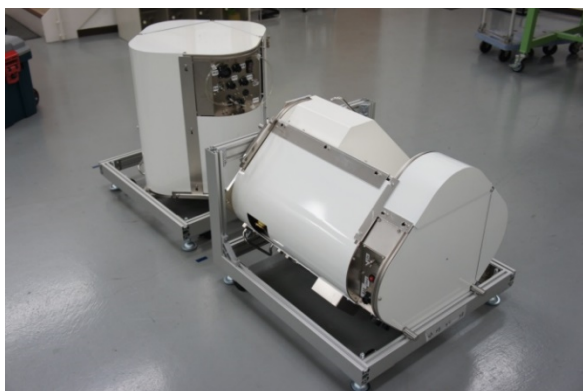


Figure 3: NDT system using portable X-band linac.

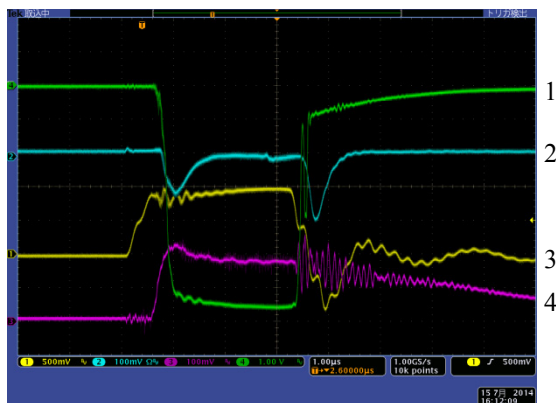


Figure 4: Typical pulse shape of electron beam with repetition 300pps. 1-Target current (Peak140mA, 2.6µs), 2-Reflected RF power, 3-Magnetron anode current, 4-Emission current (Peak380mA)

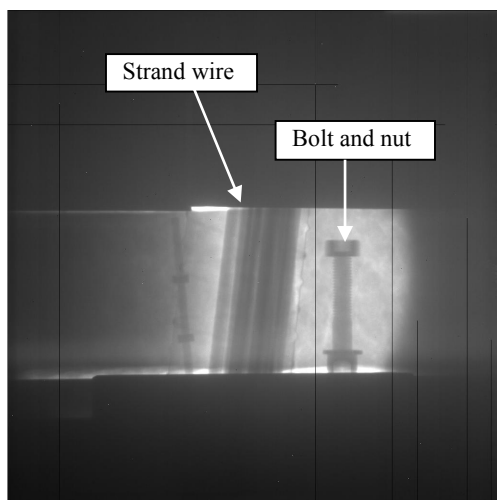


Figure 5: Transmission views of the PC bridge sample with thickness 15cm.

5. 非破壊検査装置 2号機の成果

改良した X-band 加速管による可搬型非破壊検査装置 2号機により、

- ・港湾施設コンクリートの現場検査
- ・PC コンクリート橋脚サンプルの測定
- ・単気筒小型エンジンの透過画像撮影

を実施し結果を得ることができた。港湾施設での検査は、製品出荷用波止場におけるコンクリート鉄筋診断で、狭あい部での現場検査だったが撮像に成功した。橋脚サンプルは撤去したコンクリート橋の実サンプルを X 線撮像し、老朽化した構造物検査が可能であることが確認できた。また、小型エンジンの透過画像が得られたことにより、自動車関連産業における応用も可能であることが分かった。これらの成功は、加速管の改良によって加速管が短くなり、X 線発生部 (X 線ヘッドユニット) の小型化に成功し、非破壊検査装置 2号機の小型化が実現したことによる。2号機はシステム全体を中型ワンボックスカーで搬送することができ、かつ、限られた空間への設置ができるようになった。また、装置が小さくなったにもかかわらず X 線発生量の増大に成功した。初号機ではターゲット電流が 60mA であったが、2号機では 140mA に向上した。それにより X 線強度が上がった。50mGy/min@1m を達成し、鉄 100mm 厚の構造体の検査が可能となった。測定時間は、被測定物に依存するが FPD を使用の場合で数秒、イメージングプレートでは ~10 分で画像が得られるようになった。さらに、電子銃電流が初号機と同じでありながら、ターゲット電流を上げることができた。これは加速管壁にあたってロスする電子が少なく、それによって発生する不要な X 線を抑えることができることを意味する。したがって、漏えい X 線が格段に少ない設計ができた。非破壊検査装置の仕様を Table 2 に示す。

Table 2: Specification of Portable X-band Linac for Non-destructive Testing Equipment

Energy	950keV
Current	140mA(Peak)
Repetition	300pps
Pulse width	2.6µs
Intensity of X-ray	50mGy/min@1m
Physical Description	X-ray head: 600 x700 x 600 mm
Weight	X-ray head: 47kg RF unit: 42kg PS/Controller: 110kg

この装置は、設置に約 20 分、通電・調整に約 10 分のリーディングタイムで X 線の照射を開始することができる。このように小型化、X 線線量増強、およびハンドリングが向上した非破壊検査装置が実現した。

6. まとめ

可搬型高エネルギー X 線非破壊検査装置に用いる X-band 加速管の改良を行い、加速管の小型化やビーム透過率の向上による X 線強度の増強、漏えい線量の低減を実現した。これにより非破壊検査装置の作業時間の短縮、高所・狭あい部による照射・画像取得を実現した。小型電子リニアックの可搬化とその応用範囲拡大については実使用レベルに至った。今後は、より一層の小型化・軽量化を図り、工業利用レベルの操作性を得るシステム改良に取り組む。

謝辞

本システム開発は、平成 24 年度科学技術振興機構復興促進プログラム によって実施された。支援に対し感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M.Jin, et al., “Nondestructive Test for Pipe of Petrochemical Complex using Upgraded X-band 950 keV Linac X-ray Source”, Proceedings of the 8th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 1-3, 2011 (http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS138.pdf)
- [2] M.Uesaka et al., “Commissioning of portable 950 keV /3.95 MeV X-band linac X-ray source for on-site transmission testing”, Proceedings of the 9th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 8-11, 2012 (http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/W EPL/WEPL06.pdf)
- [3] K.Dobashi et al., “Evaluation of 3.95MeV and 950keV X-ray source based on 9.3GHz X-band linac”, Proceedings of the 9th Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 8-11, 2012. (http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/TH PS/THPS129.pdf)
- [4] CST AG., <https://www.cst.com/>
- [5] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/index.htm>