

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

<sup>A)</sup> AET, Inc.

<sup>B)</sup> Accuthera Inc.

<sup>C)</sup> 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 $\mu$ 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<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[4]</sup>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)<sup>[5]</sup>を用いて電子銃から

<sup>#</sup>kanno@aetjapan.com



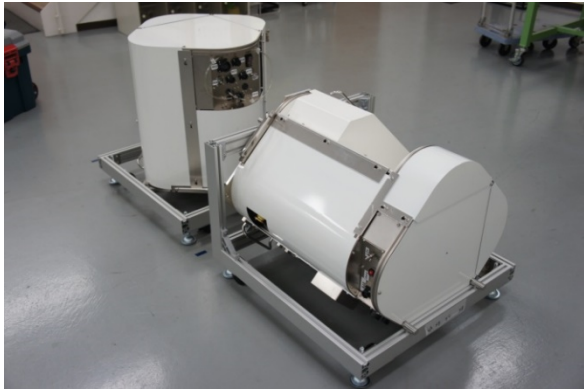


Figure 3: NDT system using portable X-band linac.

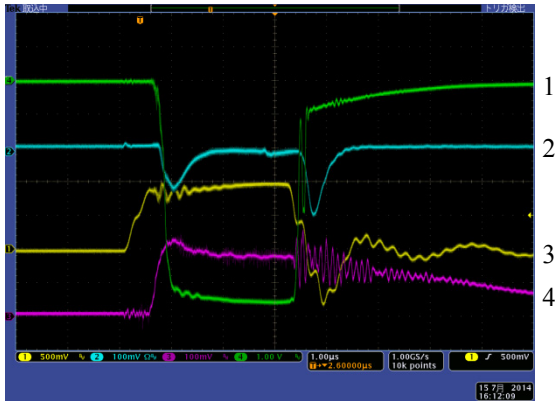


Figure 4: Typical pulse shape of electron beam with repetition 300pps. 1-Target current (Peak140mA, 2.6µs), 2-Reflected RF power, 3-Magnetron anode current, 4-Emission current (Peak380mA)

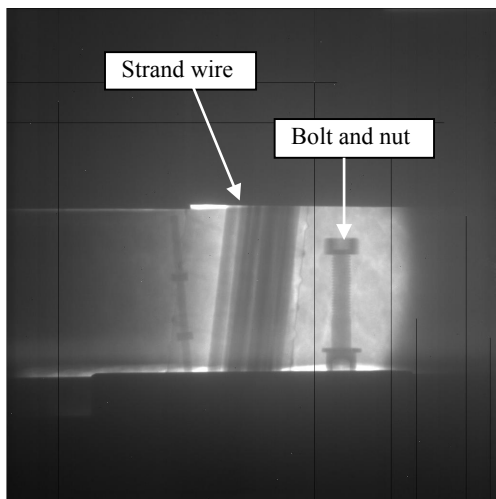


Figure 5: Transmission views of the PC bridge sample with thickness 15cm.

## 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](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](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](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>