

Xバンド LINAC を用いた屋外使用可能な非破壊検査用 3.95 MeV 小型 X 線源の開発

DEVELOPMENT OF 3.95 MeV SMALL X-RAY SOURCE USING X-BAND LINAC SYSTEM FOR FIELD USE NDT

吉田昌弘^{#, A)}, 山田貴典^{A)}, 石渡淳平^{A)}, 尾崎健人^{A)}, 山本昌志^{B)},
森重晶^{A)}, 栗原嵩司^{A)}, 林太一^{A)}, 長谷川大祐^{A)}, 川副貴裕^{C)}, 田中常稔^{C)}
Masahiro Yoshida^{#, A)}, Takanori Yamada^{A)}, Junpei Ishiwata^{A)}, Kento Ozaki^{A)}, Masashi Yamamoto^{B)},
Akira Morishige^{A)}, Takashi Kurihara^{A)}, Taichi Hayashi^{A)}, Daisuke Hasegawa^{A)},
Takahiro Kawazoe^{C)}, Tsunetoshi Tanaka^{C)}

^{A)} Metal Technologies Co., Ltd.

^{B)} Omega Solutions Co., Ltd.

^{C)} ATOX Co., Ltd.

Abstract

Many of the tunnels, bridges, and other social infrastructure facilities have been more than 50 years after their completion. The inspection technologies for the facilities are now being developed to ensure their proper maintenance and effective utilization. In the development of Non-Destructive Testing (NDT) for reinforced concrete bridges using high-energy X-rays, a previous study by Tokyo University using a 3.95 MeV compact X-ray source showed that thick concrete, which is difficult to visualize in the conventional X-ray tube energy range. In this paper, we report on the development of a practical use compact 3.95 MeV X-ray source using electron linac with a 9.3 GHz X-band magnetron that is compact enough to pass through a manhole in the box girder of PC bridges, and that can be used in harsh field environments, including improved on-site operability through common wiring, shock prevention during transportation, and dust and waterproofing measures and so on.

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたトンネルや橋梁などの社会インフラ設備は、その多くが建設からすでに 50 年が経過して老朽化が進み、それらを適切に維持管理し有効活用するため、様々なコンクリート構造物への非破壊検査技術の開発[1]が行われている。

橋梁の点検では、外観の目視検査や打音検査が基本となっており、点検により不具合箇所が確認された場合、詳細調査が実施される。詳細調査において、重大な損傷を見逃さず、適切な補修を行う上で、劣化損傷度合を正確に把握できる高精度な非破壊検査技術が求められている。特に PC(プレストレストコンクリート)橋梁においては、その性能低下の主要因である主ケーブルの腐食・破断箇所の特定や状態の正確な把握、また、それを誘発させるグラウト未充填箇所の特定など、適切な補修方法を検討する上でも重要となってくる。

高エネルギー X 線を用いた鉄筋コンクリート橋梁に対する非破壊検査技術の開発では、9.3 GHz 帯の X バンドマグネトロンを用いた 3.95 MeV 小型電子ライナックによる東大・土木研などの先行研究[2, 3]により、従来の X 線管のエネルギー領域では視覚化が困難であった厚い鉄筋コンクリートの内部観察が可能であることが示された。

本論文では、国内に多く存在する PC 橋梁の箱桁部分のマンホールを通過できるサイズを基準として装置を小型化し、配線共通化による現場での運用性の向上、

機器を移動させる際に想定される衝撃対策、粉塵・防水対策といった厳しい屋外環境での加速器システムの使用を考慮した 3.95 MeV 小型 X 線源の実用機開発について報告する。

2. 開発目標の設定

本装置は PC 橋梁の箱桁内の狭い空間で使用することを想定されているため、小型軽量化が必須であることは当然であるが、箱桁内に搬入するためのマンホールを通過できるサイズ、ということが必要最低条件である。このため、PC 箱桁橋の最も開口部が小さいマンホールでも通過可能とするため、本装置を構成する各機器の断面は、全て 450 mm×450 mm 以下で設計することとした。

箱桁内における移動は、基本的に台車や人力や仮設のクレーンによる。従って、移動時の振動や壁などへの衝突による衝撃にも耐えうる構造とするため、通常の重力に加え、各方向 4 G に耐えうる構造として設計することとした。

加速器は高電圧や高真空を要求する精密機械であり、このような機器を屋外環境で使用するため、各機器には防塵・防水対策を施すこととした。また、X バンドの高周波電力を使用するため、電波法で規定されている漏洩電力以下とするよう設計し、その性能確認のため、専用施設での EMI(Electromagnetic Interference)試験を行うこととした。さらに、屋外での放射線安全基準を満たすため、機器本体からの漏洩線量は、ターゲットから 1 m の位置において、利用線錐の 1/1500 以下となるような自己

[#] mayoshida@kinzoku.co.jp

遮蔽を有する設計を行うこととした。

一方、X 線源として要求される仕様もあり、市販されている高エネルギー X 線源と遜色ない仕様を目標とした。Table 1 に本装置の X 線特性に関する仕様をまとめる。

Table 1: X-ray Specs of 3.95 MeV Small X-ray Source

Dose rate @ 1 m	> 2 Gy/min
Dose stability	< 5 % / 1hr
Irradiation Field @ 1 m	> Dia. 410 mm with cone beam collimator
Flatness	< 5 % without filter
Symmetry	< 5 % @ +7.5 degree
Spot size	< Dia. 1.5 mm
Leakage dose @ 1 m	< 1/1500 (main dose ratio)

3. 加速器システムの設計

3.1 パルス電源と RF システム

本装置は小型軽量化が必須であるため、加速器の周波数帯は X バンドを使用することとした。RF 源には、発振周波数 9300 MHz、最大ピーク出力 2 MW、パルス幅 4 μ s、繰り返し 250~300 pps、デューティー比 1/1000 の日清紡マイクロデバイス社製 X バンドマグネトロン M1620 を採用した。このマグネトロンを駆動するため、最大 38 kV、80 A のパルス電力が必要となる。印加するパルス電圧の立ち上がりは、70~120 kV/ μ s である必要があり、ケーブルの浮遊容量の影響を避けるため、パルス電源からマグネトロンまでの同軸ケーブルの長さは約 4 m に制約される。

マグネトロン駆動用の高圧パルス電源は、10 段のマルクス回路ユニットから構成され、スイッチングには MOSFET を使用している[4]。この電源の高圧部の一部は電子銃に接続することにより、電子銃の高電圧電源も兼ねている。多段の半導体マルクス回路ユニットを活用することにより、パルストランスを省略することも可能となり、本電源システムの小型化に貢献している。

一方、熱などの影響により、マグネトロンが発振周波数および加速管の共振周波数のいずれもドリフトすることが想定されるため、AFC (Automatic Frequency Control) ユニットの用いることにより、マグネトロン機械的なチューナーは、常時、自動制御されている。本装置で使用している AFC は、RF 回路と FPGA により構成され、粗調整と精密調整の二段階でチューナーを制御している。粗調整では、スペクトラムアナライザの機能を用い、マグネトロンが発振周波数を加速モード付近で維持する。粗調整を付与した理由は、AFC が加速モード以外で AFC の位相調整機能がロックしないようにするためである。自励発振であるマグネトロンには発振可能なある程度の範囲が存在し、また、加速管には複数の共振モードが存在するため、上記の二段階の調整機能により、AFC が設計した加速モード以外でロックすることを防止している。精密調整においては、加速管からの反射波の位相のモニター値を活用する。このモニター位相を用いた調整を行う

ことにより、加速管の共振周波数とマグネトロンが発振周波数を精密に一致させることが可能となる。

3.2 電子銃

電子銃のカソードユニットには、日清紡マイクロデバイス社製 NJK2211M を用いた。NJK2211M は湾曲形状を持つバリウム含侵型熱カソードやグリッド、収束電極、碍子が一体となった構造で販売されており、アノード電極を取り付ければ、電子銃として完成する。使いやすく入手性も良い反面、カソード直径が 6.35 mm と大きい。本来は直径 3 mm 程度のカソードを採用したかったが、今回は入手性と価格の問題から NJK2211M を採用した。

また、湾曲形状のカソード表面と、予め取り付けられている集束電極の効果により、電子ビームは短い距離で強く集束されてしまい、ユーザー側でビーム集束位置を調整することは難しい。短距離でビームが強く集束されるため、ビームサイズや加速電流はアノードや第一空洞入口の位置に強く依存される。これらの最適位置を決定するためにはシミュレーションを精度良く行う必要があり、電子銃の設計においては、3 次元の CST-Studio を使用し、細心の注意を払い設計を進めた。Figure 1 に電子銃部のビーム軌道計算の結果を示す。電子銃の電圧は 16 kV、アノード電流は 755 mA である。加速管の第一空洞入口手前にビームウェストがあり、可能であればビームウェストをもう少し下流にすべきではあるが、配置の制約上、この配置が最良であると判断した。カソード表面から、第一空洞の入射口側の壁までの距離は 12 mm である。

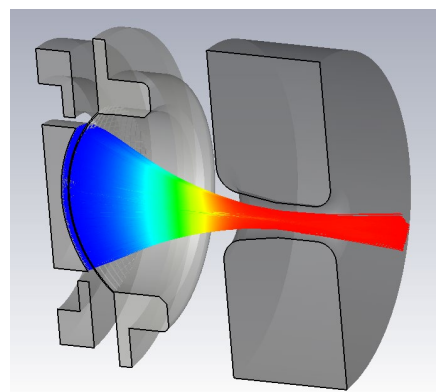


Figure 1: Electron beam trajectory calculation results using CST-Studio. From left to right, the components are the spherical cathode, grid, focusing electrode, and anode electrode. The colors indicate the energy of the electrons, with a maximum of 16 keV.

3.3 加速管

加速器は X 線ユニットを小型化するため、X バンド (9.3 GHz) のサイドカップル型を採用した。5 個のバンチャーセルと 16 個のレギュラーセルから構成され、電子銃から入射された 16 keV の電子を 3.95 MeV まで加速する。必要な RF 電力 (計算値) は 1.13 MW であり、最大出力 2 MW のマグネトロンに対し、十分な余裕がある。

加速管の寸法は、CST-Studio を用い計算した。粒子トラッキング計算には、SUPERFISH と GPT を用いた。前者を用いて加速管の電磁場の計算を行い、後者を用い

て電磁場のマップデータを読み込み、ビームトラッキング計算を行った。電子銃から加速管の第一空洞入口までの計算については、先に示した CST-Studio の電子銃部の計算結果を用いた。

Figure 2 に、ビームトラッキング計算の結果を示す。Figure 2 の上の図は、ビーム軸に沿った粒子の RF 位相との関係を示し、下の図はビームの拡がりをそれぞれ示す。Figure 3 に、ターゲット ($z=400$ mm) における電子ビームの空間分布 (左の図) とエネルギー分布 (右の図) をそれぞれ示す。本装置の仕様値であるビームエネルギー 3.95 MeV において、ビーム電流 100 mA 以上が得られていることが分かる。

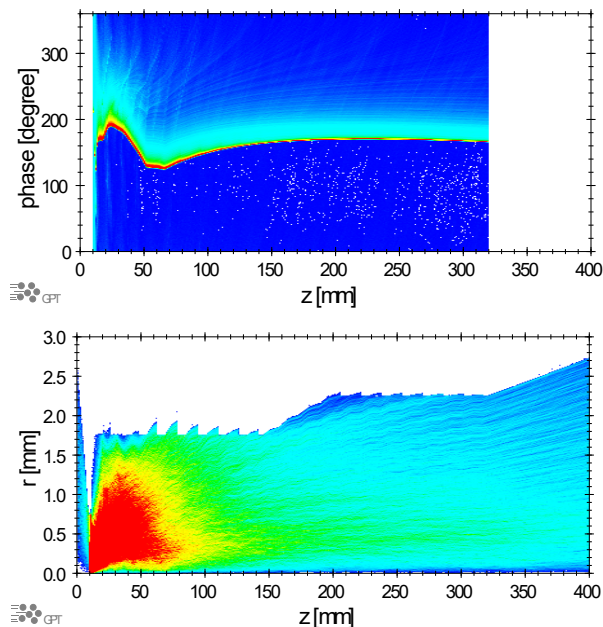


Figure 2: Electron acceleration behavior along the beam axis. Top figure: acceleration phase of electrons within the side coupled structure. Bottom figure: radial spread of the electron beam. The maximum accelerating electric field is at 180 degrees, with longitudinal convergence occurring from 0 to 180 degrees and transverse convergence from 180 degrees to 360 degrees.

本装置において、電磁石によるビーム集束機構は無いが、ビームの集束には RF を利用している。RF によるビーム集束の様子は、Fig. 2 の加速 RF 位相の様子で分かる。RF 位相 180 度が最大加速電場を示し、0 から 180 度が縦方向への集束に寄与し、180 度から 360 度が横方向への集束に寄与している。電子銃から加速管の第一空洞入口に電子が入射した直後、2 個の加速空洞はビームの加速に加え、横方向への集束を行い、その後、縦方向の集束を行いつつ 3.95 MeV まで加速する。Figure 2 の上の図より、加速 RF 位相からビームの径方向への集束が若干不足していることが分かり、そのため、Fig. 2 の下の図のように、ビームが広がってしまっている様子が分かる。また、このビーム拡がりのもう一つの原因として、電子銃が挙げられる。本電子銃は電子が引き出された後、急激に集束されてしまうという構造を有しており、加速管入口手前にビームウェストが存在している。電

子銃の集束および加速管の最上流部 2 セルくらいの径方向の集束については、今後の課題である。

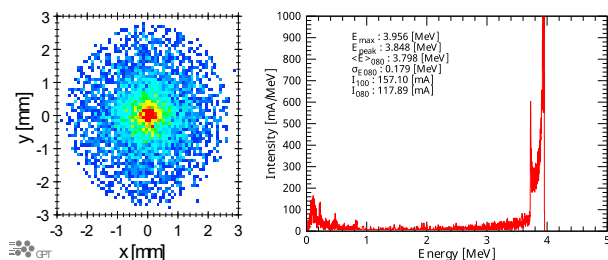


Figure 3: Electron beam characteristics on the target. The left plot shows the electron density distribution, while the right plot shows the energy distribution.

4. ターゲットおよび遮蔽設計

4.1 ターゲット・コリメータ設計

3.95 MeV に加速された電子ビームは、薄いタングステンターゲットに衝突し、制動 X 線と熱に変換される。いわゆる透過型ターゲットであり、X 線への変換効率と除熱がターゲットの性能を左右する。ターゲット形状は、PHITS を用いたモンテカルロ計算と伝熱シミュレーションを用いて設計を行った。また、同様に PHITS を用いてコリメータ形状を最適化し、仕様を満足するよう X 線の線量率、照射野の計算を行った。

Figure 4 に PHITS によるターゲット部の計算結果 (左) とターゲットから 1 m 先の利用線錐における照射野の線量率分布 (右) をそれぞれ示す。ターゲットから 1 m 下流において、照射野として直径 410 mm 以上、利用線錐における線量率として 2 Gy/min 以上が確保できていることが確認できた。

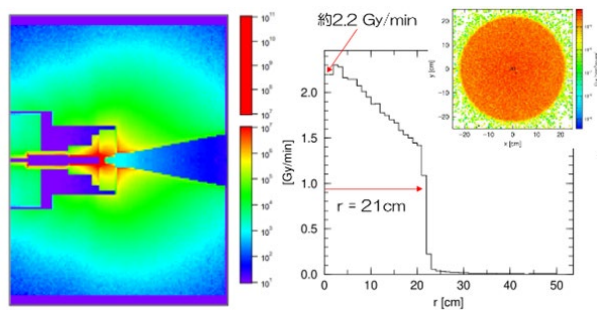


Figure 4: X-ray simulation results using PHITS. Left figure: Contour diagram of X-ray dose around the target. Right figure: X-ray dose rate distribution at 1 m downstream from the target.

4.2 遮蔽設計

本装置は屋外で使用することが想定されているため、利用線錐方向 (ターゲット正面に対し、 ± 7.5 度方向) を除く、ターゲットから 1 m の位置において、主線 (利用線錐線量率) の 1/1500 まで減衰させることが要求されている。Figure 5 に PHITS を用いて計算した漏洩線量の結果について示す。上図はターゲットおよび加速管周辺の光子のコンター図を示しており、下図は同じ計算結果のコ

ニットは約 160 m のケーブルで接続されており、本装置のオペレータは、X 線発生源から十分離れた安全な場所で運転することが可能である。

7. X 線性能評価試験

7.1 FPD を用いた X 線特性試験

Figure 7 に FPD (Flat Panel Detector) を用いた X 線特性試験の写真を示す。X 線特性試験では、照射野、焦点サイズ、対称性、平坦度について、それぞれ要求仕様を満足しているか確認を行った。

その結果、以下に示すように、要求仕様を十分満足していることが確認できた。

- 照射野: 直径 410.3 mm
(要求仕様: 直径 410 mm 以上)
- 焦点サイズ: 水平 1.07 mm / 垂直 1.11 mm
(要求仕様: 直径 1.5 mm 以下)
- 対称性: $-0.96 < \text{対称性} < +1.04$
(要求仕様: $\pm 5\%$ 以下)
- 平坦度: $-0.98 < \text{平坦度} < +1.03$
(要求仕様: $\pm 5\%$ 以下)

一方、線量率については、電子エネルギー 3.95 MeV、ターゲット電流 100 mA、ビームパルス 3.2 μsec 、繰返し周波数 280 pps の運転パラメータにおいて、ターゲットから 1 m 下流で 2 Gy/min の線量率を確認することができた。また、利用線錐以外では、漏洩線量は主線比 1/1500 以下に減衰できていることが確認できた。

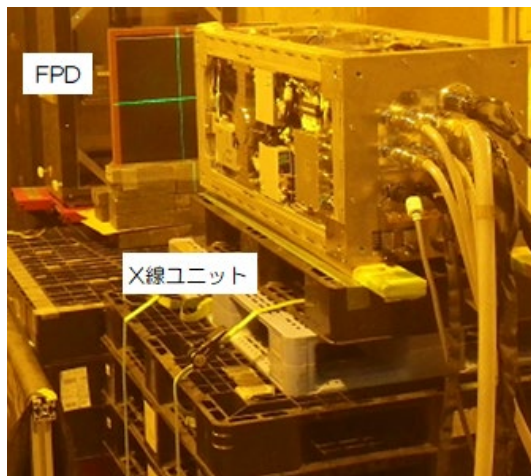


Figure 7: X-ray property verification test with FPD (Flat Panel Detector).

7.2 コンクリートファントムを用いた X 線撮影試験

Figure 8 に内部に丸鋼や異形棒鋼を配置したコンクリートファントムの X 線撮影結果を示す。ただし、Fig. 8 の下の写真とその右の図において、赤い四角で示した部分は、異形棒鋼がコンクリートで埋められた部分であり、この部分は初めから隙間が無いことに注意されたい。

丸鋼と異形棒鋼の上部は、円筒との間にすき間があり、X 線透過画像において、丸鋼と円筒の隙間が確認できる。これは実際の PC 橋梁の非破壊検査において、最も重要とされる PC 棒鋼のグラウト充填、未充填を判断することに相当する。

従って、本装置を用いて 1,000 mm のコンクリート厚さを持つ実際の橋梁検査で必要とされる性能を十分満足していることが確認できた。

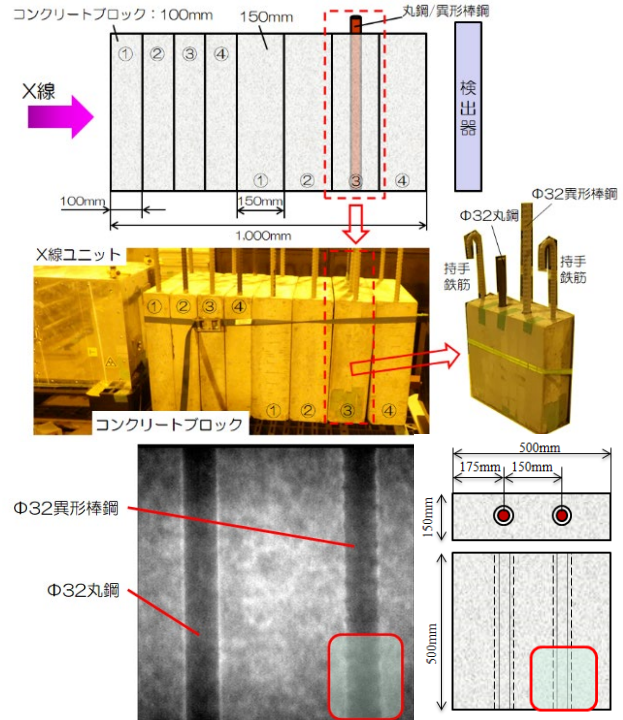


Figure 8: Radiographic testing using concrete phantoms which have steel bars.

8. まとめ

橋梁検査等、屋外使用に適した 3.95 MeV 小型 X 線源の実用機を開発した。現場での取り回しを考慮した配線共通化や移動時の衝撃対策、粉塵・防水対策といった、厳しい屋外環境での使用を想定した設計を実現することができた。また、装置をユニット化して小型化し、国内に多く存在する PC 橋梁の箱桁部に侵入するためのマンホールを通過できる装置サイズを実現した。

放射線安全への対策として、ヘビーアロイ等を用いたコンパクトな自己遮蔽構造を採用し、ターゲットから 1 m の位置において、主線比 1/1500 に減衰していることが確認できた。

FPD を用いた X 線特性試験を行い、X 線に関する要求仕様を満足していることが確認できた。また、内部に丸鋼を仕込んだ厚さ 1,000 mm のコンクリートを用いた X 線透過画像を撮影し、丸鋼の識別および丸鋼と円筒の隙間などを見分けることができた。これにより、本装置は、実際の橋梁検査で必要とされる性能を十分満足していることが確認できた。

謝辞

本装置開発において、主要機器であるマグネロンおよび電子銃用のパルスモジュレータ電源の小型化に関し、株式会社パルスパワー技術研究所の生駒直弥氏、徳地明氏のご尽力に感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Aoki, “PC 道路橋における非破壊検査の活用”, プレストレストコンクリート, Vol. 56, No. 6, 2014, pp. 53-60.
- [2] M. Uesaka *et al.*, “可搬型 950 keV/3.95 MeV X バンド電子ライナック X 線源による産業/社会インフラ診断”, J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 12, No. 3, 2015, pp. 142-151.
- [3] H. Takeuchi *et al.*, “コンクリート橋検査における可搬型高エネルギーX 線源の透過 X 線撮像能力の定量化”, 土木学会論文集 E2, Vol. 74, No. 1, 2018, pp. 66-79.
- [4] N. Ikoma and A. Tokuchi, “1.7 kV SiC MOSFET を用いた半導体 MARX 型マグネトロンモジュレータ”, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 29-September 1, Funabashi, Japan, 2023, pp. 763-765.