

950keV/3.95MeV X バンドライナック X 線源の社会・産業インフラ特定検査への展開

FORWARD SPECIAL INSPECTION OF SOCIAL AND INDUSTRIAL INFRASTRUCTURES BY 950 KEV/3.95 MEV X-BAND LINAC X-RAY SOURCE

上坂 充^{#,A)}, 藤原 健^{A)}, 土橋 克弘^{A)}, 裴 翠祥^{B)}, 武 文晶^{B)}, 草野 譲一^{C)}, 中村直樹^{C)}, 田辺 英二^{C)}, 菅野 浩一^{D)}, 大矢 清司^{E)}, 服部 行也^{E)}, 三浦 到^{F)}, 本間 英貴^{F)}, 木村 嘉富^{G)}
Mitsuru Uesaka^{#,A)}, Takeshi Fujiwara^{A)}, Katuhiro Dobashi^{A)}, Cuixiang Pei^{B)}, Wenjing Wu^{B)}, Jyoichi Kusano^{C)}, Naoki Nakamura^{C)}, Eiji Tanabe^{C)}, Koichi Kanno^{D)}, Seriji Ohya^{E)}, Yukiya Hattori^{E)}, Itaru Miura^{F)}, Hidetaka Honma^{G)}, Yoshitomi Kimura^{H)}

^{A)} Nuclear Professional School, University of Tokyo, ^{B)} Dept. Nucl. Eng. Manag, University of Tokyo,

^{C)} ACCUTHERA Inc., ^{D)} AET Inc., ^{E)} Hitachi Power Solution Ltd., ^{F)} Mitsubishi Chemical Ltd.,

^{G)} Power Works Research Institute, ^{H)} National Institute for Land and Infrastructure Maintenance

Abstract

We have developed and upgraded portable 950keV/3.95MeV X-band (9.3GHz) linac X-ray sources for on-site NDT (Nondestructive Testing) for social and industrial infrastructures. We integrate the hardware devices as well as software systems. As for the hardware, we established all designed parameters including X-ray intensities of 0.05/2 Gy/min at 1m for 950keV/3.95MeV systems, respectively. We successfully performed on-site inspection by the 950 keV system three times, namely a nitrogen acid distillation tower, reinforced concrete pier and a large sample cut from a bridge. Concerning the software, we adopted the wavelet analysis for enhanced image contrast and partial angle CT (Computed Tomography) for small ROI (Region Of Interest). The partial angle CT is inevitable to reconstruct an inner reinforced iron structure in concrete. By using the 3.95MeV system we are successfully performing the partial angle CT (120, 90, 60 degrees) in order to get the X-ray images of the inner structure, determine the sizes of reinforced iron parts and evaluate the mechanical tolerance at the experimental room. We shall start an outside experiment for large cut samples of real bridge at Power Works Research Institute this year. We are going to accumulate our experiences in order to apply these technologies for regular on-site inspection of social and industrial infrastructures in Japan and world.

1. はじめに

950keV/3.95MeV X バンド(9.3GHz)ライナック X 線源の開発を完了し、化学工場での硝酸蒸留塔の内部構造の検査に成功したところまで 2 年前口頭発表した。その後原子力基礎基盤研究イニシアティブと JST 震災復興促進プログラム、国交省建設技術研究開発助成制度事業に採択されて、高エネルギー X 線検査専用 Si ストリップ X 線カメラの開発、950keV/3.95MeV システム構成の改良と利用促進を行っている。最新の結果を紹介する[1-4]。

2. 950 keV システムによる現場透視検査

950keV 電子ライナック X 線源をより現場で操作性を向上させるべく、Figure 1 のように X 線源ユニットと高周波源ユニットをほぼ直方体にして、角は R を付け、内部は剛なブレードで囲む構造にした。X 線強度は 50mGy/min@1m で、X 線カメラとして Perkin Elmer 社の XRD-0820 (空間分解能が 0.2 mm で放射エネルギー範囲が 20keV~15MeV) を使い、用途に

よってイメージングプレート(IP)を使用している。

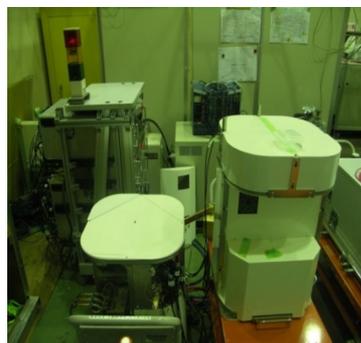


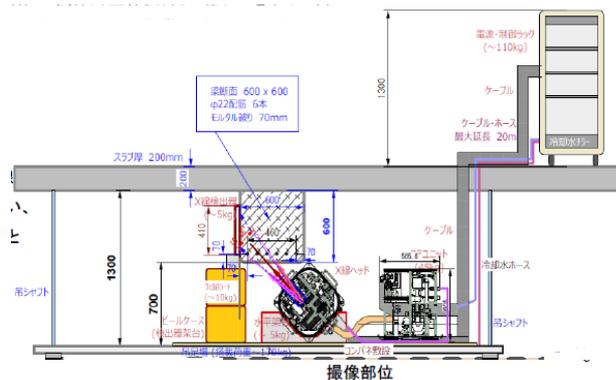
Figure 1: Upgraded 950 keV X-band linac X-ray source system.

最初のその場透視検査は、平成 24 年 5 月に福島県小名浜の化学工場の高さ約 30m の蒸留塔の内部構造検査であった。地震によって傾き、そこは補修したものの、内部の健全性のチェックが目的であった。30mm 厚の鉄製容器の水平方向透視による軸構造、斜め透視で鉄実効 180mm 厚で皿プレートの小孔群が観察できた。X 線カメラで位置合わせし、IP にて数分から 30 分の露光時間であった。いずれも構造

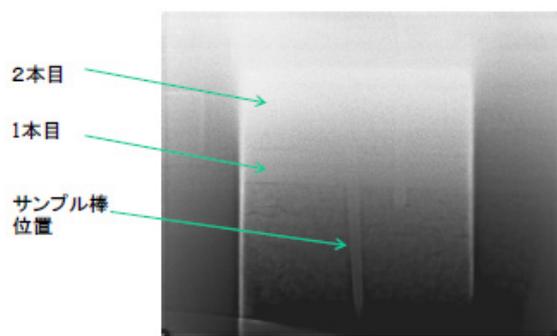
[#] uesaka@nuclear.jp

健全性を確認できる結果であった。

第 2 回目は平成 26 年 1 月の、化学工場の機材搬出入用棧橋の鉄筋コンクリートの内部鉄筋構造の透視検査であった。ここでは面積約 20x100m² の下面の構造強化梁の全域に対して、目視と打音による予備検査を行い、健全な箇所とコンクリートが剥がれ明らかに補修が必要とされる箇所を除外した X 線検査対象箇所 7 箇所が絞り出されていた。そのうちの 3 箇所の検査を行った。X 線源、検出系、固定電源のレイアウトを Figure 2(a) に示す。IP による透視画像結果の 1 例を Figure 2(b) に示す。やや薄い画像となっているがもともと 23mm 直径の鉄筋の現在の直径が 1mm 以内の精度で評価できた。今回は 3 箇所に検査を実施した。透視直径評価の結果より鉄筋コンクリート全体の構造解析を行い、大型補修でなくさらなる腐食を防ぐための表面の防水加工のみで済むと判断できた。次回は残り 4 箇所を行う。



(a) The layout



(b) X-ray Projection image

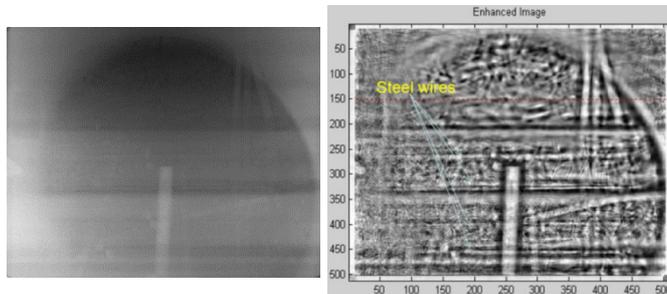
Figure 2: Layout (a) and projection image (b) of on-site inspection for a bars at a chemical work by the 950 keV system.

第 3 回目は国土技術政策総合研究所の委託研究に参画し、劣化実機橋梁切り出し試料によるベンチマーク試験に参加して、同研究所サイトで行った。その様子と結果の 1 例を Figure 3(a) に示す。実機橋梁の橋桁周辺に、X 線源と検出システムを自動配置できる駆動システムを作製して試験を行った。結果の 1 例を Figure 3(b) に示す。ここで wavelet 解析に

よる鉄筋・コンクリートの境界の強調画像処理を行った。左が処理無し、右が処理有りである。処理無し画像ではぼんやりとしか映っていない鉄筋も明確になっている。高エネルギー X 線非破壊検査の画像の最大の問題は低エネルギー散乱 X 線によるぼけである。重厚なコリメータを使ったラインセンサを使えば、物理的にそれらを抑制できる。しかし、検出システムは重厚になり、かつその場で迅速に 2 次元画像も得られず、その場検査には適用できない。従ってこの wavelet 解析のようにソフト的なノイズカットも不可欠である。



(a) X-ray source and cut sample of rel bridge



(b) Projection images without(left)/with(right) the wavelet analysis for contrast enhancement

Figure 3: Outside test for cut sample of real bridge by the 950 keV system at National Institute for Land and Infrastructure Maintenance.

X 線源と検出器と対象の位置を変えて投影画像を得れば、幾何学的に対象物の実寸が評価できる。それを行えば、鉄筋構造も 1mm 以内で形状評価ができる。

3. 3.95MeV システムと利用

3.95MeV X バンドライナックシステムの全体像を Figure 4 に示す。本システムの X 線発生強度は 200pps で 2Gy/min@1m である。HVPS,制御ユニット、高周波源ユニット、加速器ユニットは各 116 kg、62 kg、114 kg で加速ユニットの加速管部(62 kg)とコリメータ部(80 kg)は分離可能である。また、高周波源ユニットと加速器ユニットを繋いでいる導波管はフレキシブルな素材でできており、90 度まで曲げて運転することが可能である。

橋梁 PC(Pre-stressed Concrete)材の測定試料を Figure 5(a) に示す。測定を行った部分は下部の厚さ 40 cm の部分になる。PC 材は図に示すように外径 7 mm 鉄ワイヤが 15 本程度外径 30mm 程度の鉄パイプ

中に束ねられ、そのパイプが断面中に複数挿入されている。両端から引張応力が印加されて今強化されている。今回は実験室にて、将来の現場で不可欠な部分角度 CT と、少ない方向からの投影画像から断面層ごとのコントラスト強調画像取得の Tomosynthesis の実験を行った。Figure 5(b)に 360° CT と 90° CT の再構成結果を示す。ここでは再構成領域を注目の鉄筋部に限定した小面積 ROI (Region of Interest)-CT の手法も使っている。360° CT では 7mm 径の内部鉄筋構造が明確に再構成されている。一方 90° CT では投影データが不十分のため、再構成画像に楕円的歪みが生じている。しかし実際の現場では 90° あるいは 60° の CT が限界であろう。我々がこのあと、2つの 60° CT データを組み合わせた再構成も試みた。結果、投影データが増えたため、画像の楕円的歪みが解消された。その結果も発表時に報告する。

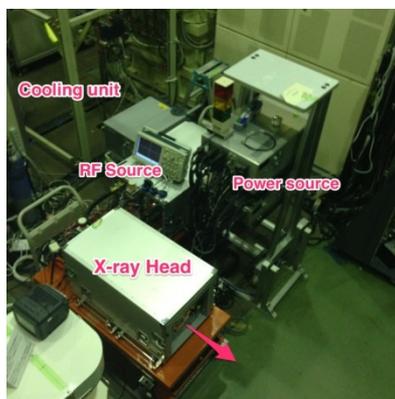
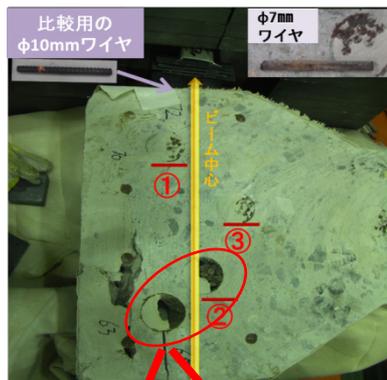
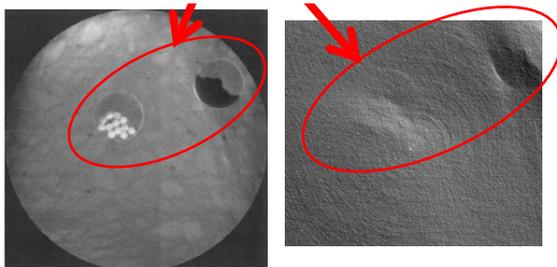


Figure 4: 3.95 MeV X-band linac X-ray source system.



(a) Slice-cut sample of PC bridge



(b) Reconstructed images

Figure 5: Slice-cut sample of PC (Pre-stressed Concrete).

(a) and reconstructed images (b) by full angle-(left) and 90-degree-partial-angle(right) CTs

橋梁その場検査用のみ 3.95MeV まで放射線障害防止法で許可されているが、我が国で初めてとなるので、原子力安全規制庁の確認を得て、土木研究所にて管理区域外試験を行う。

4. まとめと今後の展開

950keV システムに関し、X線発生ヘッドと高周波源ボックスを、頑丈な立方体フレームに入れて、その操作性と信頼性を向上させた。結果、酷寒暴風雨深夜の化学工場栈橋の鉄筋コンクリートの内部構造検査、構造強度評価、修復方策達成に成功した。高周波加速器システムとしては画期的実績である。また国土総合技術政策研究所の委託研究にて実機橋梁試料のベンチマーク試験に参加し、内部鉄筋の撮像に成功した。現在狭隘な現場での、限定された方向からの透視データと Tomosynthesis 法による内部形状補正、部分角度 CT の技術にも目途が立てられた。これらにより、ハード (X線発生と検出)・ソフトの総合的システムが完成される。今年度いっぱい国内の社会・産業インフラの試験の実績を積み、来年度は海外進出を計画している。950keV システムでの実績と知見はすべて 3.95MeV システムに反映される。笹子トンネルでの事故を受けて、今年から我が国すべての橋梁に 5年に1度の健全性検査が義務付けられた。950keV 試験で実績があるように、目視・打音のスクリーニングのあと、他の手法含め、要詳細検査に採用されることを目指す。

参考文献

- [1] M. Uesaka, et al., "950keV, 3.95MeV and 6MeV X-band linacs for nondestructive evaluation and medicine," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 657, pp. 82-87, 2011.
- [2] M. Uesaka, et al., "Commissioning of portable 950 keV/3.95MeV X-band linac X-ray source for on-site transmission testing", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.5, No.2 (2013) p.93 - p.100 (2013).
- [3] W. Wu, et al., "Partial CT and Structural Analysis with 950 Kev/3.95Mev X-Band Linac X-Ray Sources", E-Journal of Advanced Maintenance Vol.5, No.2, 08-26(2013)
- [4] 三浦 他, 日本設備管理学会平成 26 年度春季研究発表大会論文集, p.21-p.24 (2014)

謝辞

部分角度 CT 実験に関して、(株) XIT の多大な協力をいただきました。深く感謝申し上げます。