

話 題

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 / 社会インフラ診断上坂 充^{*1}・橋本 英子^{*1}・土橋 克広^{*1}・藤原 健^{*2}・草野 譲一^{*3}・大矢 清司^{*4}
三浦 到^{*5}・大島 義信^{*6}・石田 雅博^{*6}Mobile 950 keV/3.95 MeV X-band Electron Linac X-ray Sources and Industrial/Societal
Infrastructure InspectionMitsuru UESAKA^{*1}, Eiko HASHIMOTO^{*1}, Katsuhiko DOBASHI^{*1}, Takeshi FUJIWARA^{*2}, Joichi KUSANO^{*3}
Seiji OYA^{*4}, Itaru MIURA^{*5}, Yoshinobu OSHIMA^{*6} and Masahiro ISHIDA^{*6}

Abstract

We have developed portable X-band (9.3 GHz) 950 keV/3.95 MeV linac X-ray sources. We are applying the 950 keV system for nondestructive testing of industrial and societal infrastructures such as reaction tower, pier and bridge (thinner than 400 mm). Not only the inner structure, but also dynamic image of the inner fluid can be obtained. We have joined the benchmark test for cut samples of a real bridge with other NDT methods hosted by National Institute of Land and Infrastructure Management. We have successfully performed 3.95 MeV electron linac X-ray inspection of bridge sample at Public Works Research Institute for the first time in Japan. We use flat-panel X-ray camera, imaging plate, partial angle CT and Tomosynthesis so that iron-wires of 7 mm diameter can be reconstructed with 1 mm spatial resolution.

1. はじめに

東京大学原子力専攻では 25 年間 X バンド (9.3-11.424 GHz) 電子ライナックの開発研究を実施している。フェムト秒電子パルス生成用小型システム設計¹⁾、小型コンプトン散乱 X 線源の開発²⁾からスタートし、平成 18, 19 年度経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業、平成 21, 22 年度地域産学官共同研究拠点整備事業 (JST, 茨城県)、平成 24-26 年度 JST 復興促進プログラムにて、産業インフラ検査用の 950 keV X 線源システムの第 1 号機 (9.4 GHz)、2 号機 (9.3 GHz)、及び、3.95 MeV X 線源システムを開発した。その後、国土交通省研究開発プロジェクト、土木研究所委託、国土総合技術政策研究所委託、内閣府 SIP (Strategic Innovation Program) にて、

橋梁など社会インフラ検査への実用化研究が実施された^{3, 4)}。放射線障害防止法、電離放射線障害防止規則によって、屋外使用が可能な 950 keV システムはすでに 10 回程度のその場検査の実績がある。平成 17 年に放射線障害防止法は改正になり、橋梁に限って 4 MeV 以下の電子加速器の、電離放射線障害防止規則に準じた屋外使用が可能となった。平成 27 年 1 月 29 日に土木研究所にて実橋からの切り出し試料にて 3.95 MeV システムの野外試験が、原子力規制庁による使用場所変更届の受理を受け、日本で初めて安全裡に実施された。今年度よりいよいよ実橋の検査が始まる。実橋での検査は、X 線源 (950 keV/3.95 MeV) のみならず、検出器、内部構造再構成手法、駆動架台、足場、構造健全性評価等の総合複合システムとなる。検査対象場所が設定されれば、その

*1 東京大学 The University of Tokyo
(E-mail: uesaka@tokai.t.u-tokyo.ac.jp)

*2 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

*3 (株)アキュセラ Accuthera Inc.

*4 (株)日立パワーソリューションズ Hitachi Power Solutions Co., Ltd.

*5 三菱化学(株) Mitsubishi Chemical Corporation

*6 土木研究所 Public Works Research Institute

空間的状況、アクセス、環境等に応じて臨機応変に最適な方法を選定していく必要がある。しかも検査は準備・撤収含め数日で行わなければならない。それを実現させるには、1つの透過画像は数秒で取得できることが絶対条件である。本稿ではここまでの実績と将来の展望を述べる。なお、本開発研究では、(株) 関東技研、データ処理で(株) XIT、(株) AXION-JAPAN、法政大学の協力を得ている。

2. 可搬型高エネルギー X 線源

2.1 9.3 GHz X バンドライナック

一般に X 線非破壊検査では、X 線管により発生される制動輻射 X 線（及び特性 X 線）が用いられる。X 線管は陰極と陽極との間に高電圧を印加し、陰極と陽極の間に発生した静電場にて電子を加速し、ターゲット（標的）に入射することにより制動輻射 X 線や特性 X 線を得るものである。陰極-陽極間に高電圧を印加する必要があるが、電気絶縁耐圧の制約があり高電圧化が難しい。

一方、電子線形加速器（Linear accelerator: Linac, リニアック, ライナック）ベースの高エネルギー X 線システムが存在し、運搬可能な大型構造物（発電用の蒸気タービン等）の検査にも用いられている。電子線形加速器は、電子線を高周波空洞（加速管）に蓄積された高周波（RF）の電界により加速するものである。RF による電子線の加速は従来の X 線管等と異なり、高い直流高電圧なしで高エネルギーの電子線（及び X 線）を得ることが出来るという長所がある。電子線加速器の主構成要素は、電子銃と加速管に RF を供給する RF 源からなり、RF 源としてはマグネトロンやクライストロンが用いられることが多い。マグネトロンやクライストロンを駆動する高圧電源は必要であるが、駆動電圧自体が発生される X 線のエネルギーに直接関係する訳ではない。しかし、X 線管と比較して構造が複雑であり、運転も難易度が高い。このような X 線源は価格もさることながら、設置場所から移動させての使用は法的にも構造的にも困難であるため、屋外にてプラント等の検査に用いることは事実上不可能と考えられていた。

上述の電子線形加速器では、従来は高周波（RF）として S バンド（2～3 GHz）と呼ばれる周波数

帯が用いられることが多かった。これは歴史的な理由もあるが、加速管の機械加工精度等の要因もある。しかし、S バンド電子線形加速器は比較的大きく、可搬型とするのは困難である。小型化するためには、RF の周波数を高くする必要がある。これは、単純に周波数が上がれば波長が短くなる波動の性質による。周波数を 4 倍にすれば、高周波電界（電場）の波長は 4 分の 1 になり、加速空洞の径は 4 分の 1 となる。単純に考えれば体積は 32 分の 1 となる（実際はそれほど単純ではない）。X バンド（8～12 GHz）は、周波数が S バンドの 4 倍の周波数帯であり、本研究グループは 9.3 GHz のマグネトロンを RF 源とした電子線形加速器ベースの X 線源の実用化を目指している。我々は、X バンド採用による小型化が可搬型高エネルギー X 線システムの実現に不可欠であり、総合的にも大きなアドバンテージであるとの考えから X バンドライナックを採用した。

2.2 可搬型高出力 X 線システム

前述の通り、本研究グループでは、X バンドライナックを用いた可搬型高エネルギー X 線システムを開発し実用化に向けた試験を行っている。現在試験中の装置は二種類ある。ひとつは 9.3 GHz, 300 kW (peak) のマグネトロンを高周波源とし、最大 950 keV, 50 mGy/min @ 1 m の制動輻射 X 線を生産できる 950 keV X 線システムである。もうひとつは、9.3 GHz, 1.5 MW (peak) のマグネトロンを高周波源として使用した 3.95 MeV X 線システムである。これは、3.95 MeV, 2 Gy/min @ 1 m の制動輻射 X 線を生産できる。いずれの装置も、利用線錘照射野は 1 m 先で直径 30 cm となるよう、タングステン合金製のターゲットコリメーターを具備している。

図 1 に 950 keV X 線システムの外観を示す。X



図 1 950 keV X 線システムの外観写真⁵⁾

線発生装置は2個の白い筐体と1台の制御ラック（左奥の赤色灯のあるラック）で構成されている。左の白い筐体は高周波（RF）源である9.3 GHzのマグネトロンを内蔵した「RFユニット」であり、右は電子銃・加速管を内蔵した「X線ヘッド」である。RFユニットとX線ヘッドはフレキシブル導波管で接続され、マグネトロンで発生した高周波をX線ヘッド内の加速管へ送る。X線ヘッドに内蔵されている950 keV電子ビーム加速管の長さは12.5 cm（1である。電子銃については、陰極電圧は20 kVであるが、樹脂モールドとして絶縁を施すことにより小さな筐体内への設置を容易にしている。制御ラックには、制御ユニット、マグネトロン駆動用の高電圧電源、高圧電源制御ユニット等や冷却水装置（チラー）が収納されている。電源はAC単相200 Vである。

図2は3.95 MeV X線発生装置の外観である。筐体は、手前左下のX線ヘッド、中央右の制御ラック、制御ラックの左のRFユニット、その奥にある冷却水装置の4個である。X線ヘッドはターゲットコリメーターを具備しているが、この重量だけでも80 kgある。X線ヘッドの重量は100 kgを超える程度であり、X線ヘッドの質量の大部分はターゲットコリメーターが占める。今後950 keV X線発生装置と同様に着脱可能とすることも検討している。1.5 MWマグネトロン収納のRFユニットも、950 keV X線発生装置に比べ大型化している。また、冷却水装置は別筐体となっている。その他の構成は950 keV X線発生装置とほぼ同様である。電源については、実験室内ではAC三相200 V, 単相100 Vを利用しているが、制御ラックに収納されている各モジュールはAC

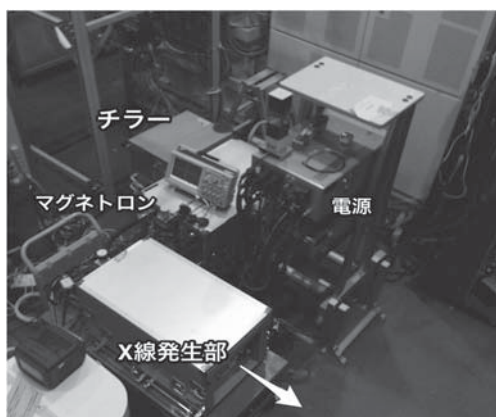


図2 3.95 MeV X線システムの外観⁵⁾

単相200 V/100 Vで使用可能である。装置の総重量（4個の筐体の合計）は約400 kgである。

3. X線動画撮像に用いる検出器

X線動画撮像能力は検出システムの性能が左右すると言っても過言では無い。化学プラント現場撮像では、機材設置環境が狭所や高所である事が多い為、薄型の半導体フラットパネル検出器の使用を基本とした。

使用するX線検出器は、Perkin Elmer社のフラットパネル検出器：XRD-0822とXRD-1622の2種であり、15 MeVまでの高エネルギーX線で使用可能な特徴がある。写真1に外観、表1に主要仕様を示した。

これら検出器のX線検出素子はテルビウム添加酸化硫化ガドリニウム（ $Gd_2O_2S:Tb$ (GOS)）結晶を用いたシンチレーター方式の間接型検出器で、三菱化学製のDRZおよびPI-200である。図3の様にX線がシンチレーターに入射し、発光することで後段にカップリングされたフォトダイオードアレイによってX線を検出する仕組みで



写真1 フラットパネル検出器⁶⁾

表1 フラットパネル検出器の主要仕様⁶⁾

	XRD-0822 A014 IND	XRD-1622 A019 IMG
Detector Size	8"×8" (20 cm×20 cm)	16"×16" (41 cm×41 cm)
Energy Range	20 keV-15 MeV	20 keV-15 MeV
Scintillator Type	Gd ₂ O ₂ S:Tb DRZ Plus (Mitsubishi Chemical)	Gd ₂ O ₂ S:Tb & Cu Filter PI-200 (Mitsubishi Chemical)
Resolution	200 μm Pixel Size	200 μm Pixel Size
Phosphor Layer	208 μm, 100 mg/cm ²	436 μm, 200 mg/cm ²
Frame Rate	15 fps	1 fps
Electronics	14 bit ADC & 2 Gain Settings	14 bit ADC & 2 Gain Settings
Interface	Gigabit Ether Net (GigE)	Gigabit Ether Net (GigE)
Weight	3.7 kg	8.8 kg

ある。XRD-0822 と XRD-1622 の大きな違いは、シンチレーターの厚さと応答速度である。特に厚さに関しては、図 4 に示した様に厚さが増すほど感度が高くなるが、その一方で図 5 の様に解像度が低下するので、応答速度と合わせ、撮像案件毎に事前検討が必要になる。

4. 放射線発生装置の屋外での使用

950 keV X 線発生装置は、電子線エネルギー及

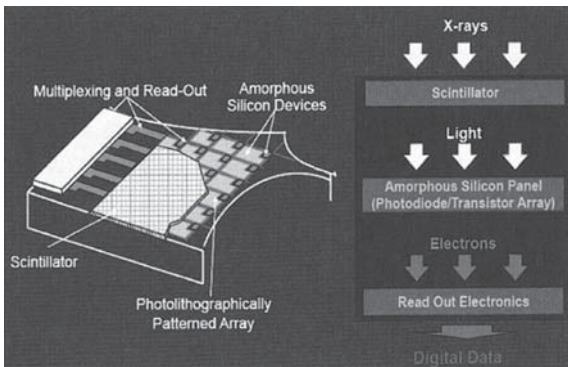


図 3 シンチレーター方式フラットパネル検出器の構造⁶⁾

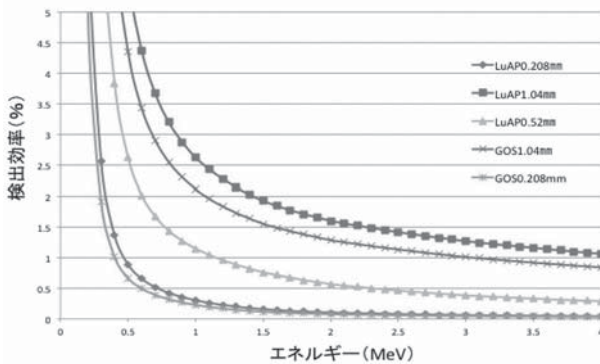


図 4 板状シンチレーターの X 線吸収率⁷⁾

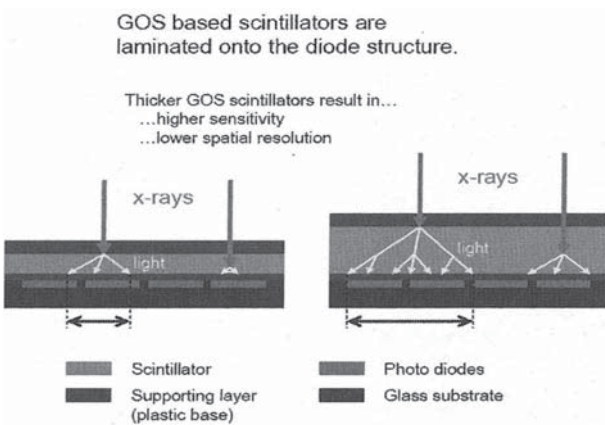


図 5 シンチレーターの厚さと解像度⁶⁾

び X 線エネルギーが 1 MeV 未満のため、放射線障害防止法では X 線源として取扱い、安全管理は電離放射線障害防止規則に従う。放射線管理区域境界では 1.3 mSv/3 ヶ月の空間線量限度で設定する。

一方の 3.95 MeV X 線発生装置は電子線及び X 線のエネルギーが 1 MeV 以上であり、放射線障害防止法で定める放射線発生装置である。しかし平成 17 年放射線障害防止法改定時に橋梁検査に限って 4 MeV 以下のリニアックの屋外使用が認められた。

その場合、「一時的な使用場所の変更」の届を監督省庁（原子力規制庁）に提出することで、一時的に使用場所を変更して橋梁の非破壊検査に供することが出来る。橋梁の非破壊検査は屋外で行われるため、放射線発生装置を屋外で使用するようになる。両システムの屋外の使用につき、上記すべての措置を完了させている。

5. 950 keV システムによる産業・社会インフラその場透視試験

5.1 化学プラント反応塔内部構造

950 keV システムは法的には X 線発生装置という扱いになるので、化学プラント等の産業インフラの非破壊検査に使用可能である。従来の X 線管のエネルギー領域では撮像が困難であった厚肉配管等の非破壊検査が可能となることが期待されており、これまでに産業インフラでの非破壊検査実証試験を 3 回実施した。

最初の撮像試験は、2012 年 5 月の化学プラントの蒸留塔の地上高さ 20 m 付近の透視画像の取得であり、厚さ 100 mm の鉄構造物内部の目皿の穴を確認することに成功した。その概略を図 6 に示す。

2 回目の試験は、民間の鉄筋コンクリート製埠頭の海面側梁内部の計測であった。埠頭の海面側に設置された仮設足場へ、分解した X 線発生装置を人力で搬入し設置した。作業環境・気候等の悪条件下にも関わらず内部鉄筋の撮像に成功した。

3 回目は 1 回目よりさらに高所の反応塔内部透視を実施、中の液体の動画像化にも成功した。

今後は各種プラントでの劣化事象の最も頻繁な回転機の内部インペラの同期画像のその場取得を

行う。このように産業インフラその場透視は動画取得の段階に入った。

5.2 鉄筋コンクリート (RC) 構造物の撮像試験

化学工場の鉄筋コンクリート製埠頭の内部鉄筋構造の透視検査を行った。ここでは埠頭床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。本検査から現場での機動性を向上させた実用試作機を使用した。X 線源、検出系、固定電源のレイアウトを図 7 に、夜間の現場撮像状況を図 8 に示す。

検出器はイメージングプレートを使用した。撮像結果の 1 例を図 9 に示す。コントラストがやや薄い画像となっているが仕様直径 22 mm の鉄

筋の現在の直径が 1 mm 以内の精度で評価できた。試験運用受入れ先の工場は図 9 に示した撮像結果より明らかとなった鉄筋残存径をもとに鉄筋コンクリート全体の構造解析 (図 10) を行い、



図 8 対象設備と夜間の X 線診断

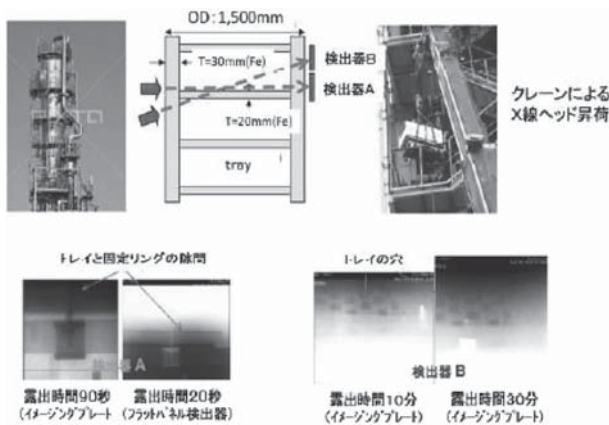
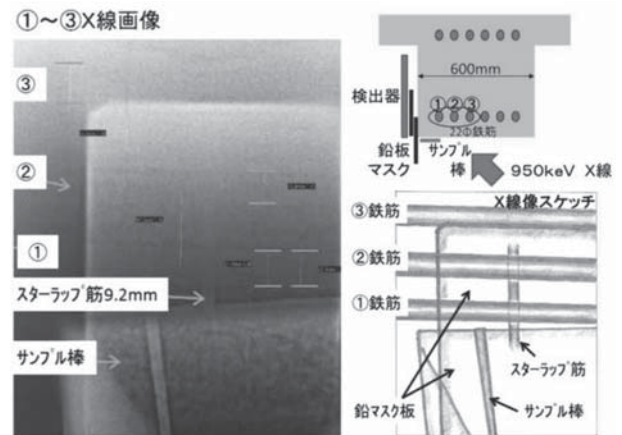


図 6 化学プラント反応塔の内部透視検査⁸⁾



	鉄筋①	鉄筋②	鉄筋③
最大断面欠損率	8.7%	14.5%	7.0%
最大減肉量	3.1 mm	6.3 mm	3.9 mm

図 9 鉄筋径の評価⁸⁾

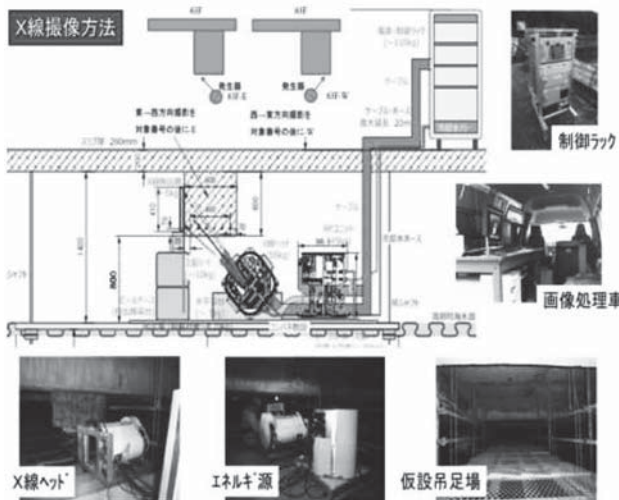


図 7 埠頭設備 RC 梁 X 線診断の構図

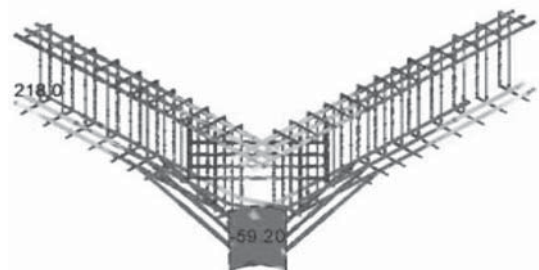


図 10 鉄筋コンクリート全体の構造解析⁸⁾

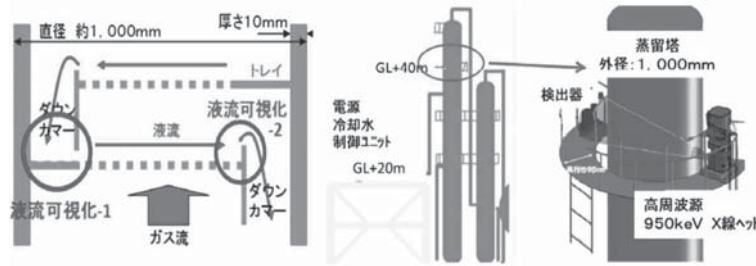


図 11 撮像部位と機材配置イメージ⁸⁾



図 12 自由度 4 軸駆動架台⁶⁾

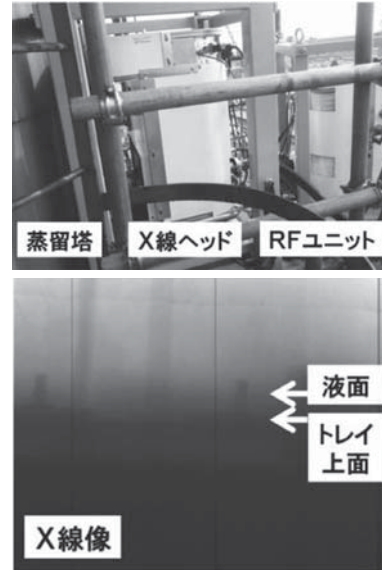


図 13 X線システム設置状況(上)と取得X線像の代表例(下)⁶⁾

大規模補強ではなく、表面の防水加工のみで済むと判断できたと本システムによる撮像結果の有用性を語った。

5.3 化学プラント蒸留塔内部流体のダイナミックイメージング撮像試験

直径 1.5 m 級の化学プラント蒸留塔の内部にある金属部品の状態を可視化する撮像試験成果を前述した。本件は、内部の液流をダイナミックに可視化する取り組みである。

対象となる蒸留塔は、直径約 1 m、塔厚約 15 mm である。蒸留塔内部の金属製薄板トレイ上を流れるプロセス液流が流下する状態をダイナミック (X線動画) 撮像する案件である。X線照射距離約 1 m 強で金属越しに液面遊動を撮像する。撮像場所は、地上 40 m の蒸留塔プラットフォーム上である。撮像部位と機材配置イメージを図 11 に示した。電源制御ラックは地上 20 m の既設主架構上に配置し、同場所で X線源を遠隔操作する。図 12 に示した X線照射方向微調整が遠隔コントロールできる自由度 4 軸の X線ヘッド駆動架台も投入した。

試験撮像の結果、図 13 に示すトレイ上液面遊

動のダイナミックイメージングに成功し、試験運用受入れ先から画期的な情報取得であるとの評価を得た。

5.4 鉄筋コンクリート (RC/PC) 構造物の撮像試験

950 keV X線システムの社会インフラへの適用の取組として、これまで国土技術政策総合研究所にて屋外に設置されているコンクリート橋梁サンプル等についての非破壊検査試験を 5 回実施した。

「道路橋等の点検効率化等への計測・非破壊検査技術の適用性検証」という課題で、(1) コンクリート構造物の内部損傷に対する非破壊検査技術適用性、(2) 目視点検困難な箇所への非破壊検査技術適用性の確認を行う目的で進められた。

超音波方式・電磁波方式等の他の非破壊検査技術による診断手法との比較という側面を含め、数多くの内部構造加工モデルコンクリートサンプ

ル, 撤去橋梁切出しサンプル, 及び, ボックスカルバートサンプルについて撮像試験を行った.

図 14, 15 に示すように, 実橋を想定した橋脚サンプルの撮像試験では, 様々な照射方向からの内部構造観察が必要とされ, コンクリート厚も 120 mm ~ 500 mm までのものを対象とした. 過半の撮像は実施できたが, 厚肉構造で幅の広い橋脚サンプル撮像では検出器に入る散乱 X 線の影響が大きく, 鮮明な画像は得られなかった.

検出器として用いた Perkin Elmer 社フラットパネル及びイメージングプレートは, 数十 keV 領域の X 線に感度の高いもので, それ以上のエネルギーの X 線非破壊検査用には必ずしも適していない. 非破壊検査専用の高エネルギー側に高感度な X 線カメラの開発が今後の課題と言える.

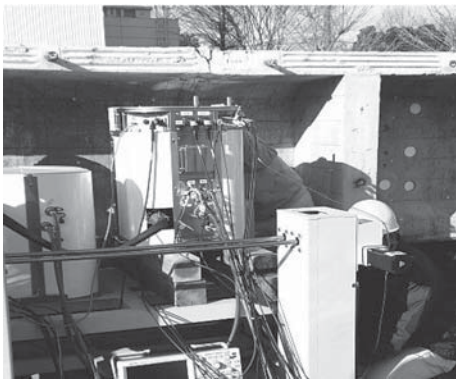


図 14 コンクリート橋脚サンプルの撮像試験

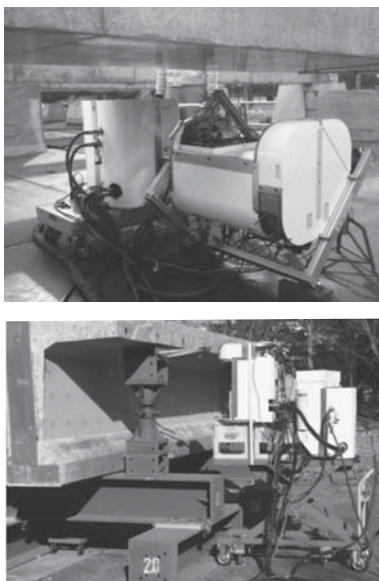
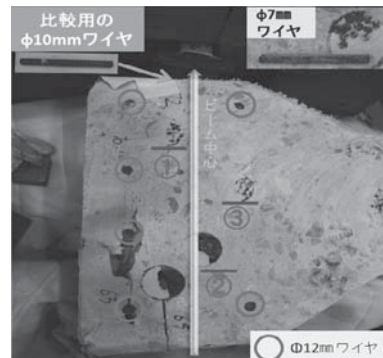


図 15 照射角度・位置を変えた橋梁サンプルの撮像

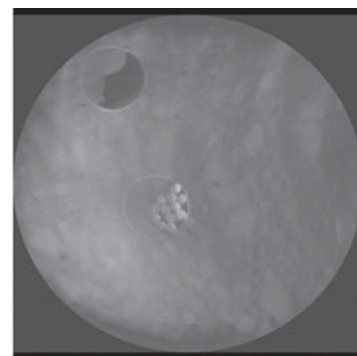
6. 3.95 MeV システムによる社会インフラその場透視試験

6.1 PC 橋梁試料の 3.95 MeV システムによる 3 次元 CT

コンクリート構造物はいわゆる鉄筋コンクリート (RC) とプレストレストコンクリート (PC) がある. プレストレストコンクリートとは, コンクリート内部の鋼材 (PC 鋼材) にあらかじめ張力を掛けた状態で製造されたコンクリート構造物であり, 構造物に対する張力を PC 鋼材により受けるものである. この PC 鋼材の強度劣化の定量的な測定の実現が望まれている. PC 鋼材においては, その有効断面積が強度に影響すると考えられ, 径または断面積の測定が望まれる. PC 鋼材は直径 7 mm のストランドワイヤーを複数束ねて金属製スリーブに入れたものであり, ストランドワイヤーの部分断裂を確認できるだけでも検査として有効であると言われている. 図 16 に PC 橋



(a)



(b)

図 16 3.95 MeV X 線源による PC 材の 3 次元 CT 結果⁴⁾
(a) 切り出し PC 材断面写真 (上下方向厚さ 40 mm). (b) 2 次元断層図. 中央のパイプ中の 7 mm の鉄ワイヤ全てが良く見える. 左上の黒い部分はワイヤが抜落ちた空孔.

の下部橋桁部から切り出された PC 橋梁の下フランジ部分の写真と 3.95 MeV システムによる CT 結果を示す。400 keV X 線管では 400 mm 厚さ部の透視に 1 時間程度要していたが、本システムでは約 1 秒で撮像可能である。そのため CT スキャンによる内部の可視化も可能となる。ラボでの実験では実際に橋梁から切り出したコンクリート片の中の直径 7 mm のワイアの 3 次元像を空間分解能 1 mm 以下で明確に可視化することに成功している。

勿論、実際の橋梁現場で 360° CT スキャンは不可能であるため、我々は部分角度 CT の実験室試験を実施して、現場に適用することを検討している。並行して、Tomosynthesis 再構成適用の検討も行っている。

6.2 日本初の 3.95 MeV X 線源の屋外使用

平成 27 年 1 月 29 日土木研究所にて、橋梁から切り出した試料を対象にした、3.95 MeV X 線源を用いた屋外での X 線非破壊検査を日本で初めて実施した。1 日で X 線装置一式の運搬、現場設置、放射線管理体系設置、測定、放射線計測、撤収を首尾よく 9 ~ 17 時以内に完了した。400 mm を超える肉厚の PC 橋梁の撤去部材を数秒程度で撮像することに成功した。ウェブ部分 (150 mm) と同様に、診断が難しいとされている下フランジ部分 (400 mm) も、内部に配置されている鉄筋の透視像が得られた (図 17)。今後、うき、空洞、グラウト等のコンクリートの欠陥等も評価していく。

7. 今後の課題

7.1 X 線源システムの最適化

X 線検査装置としての 950 keV/3.95 MeV システムの汎用性を向上させる必要がある。発生する X 線のエネルギー強度、線量強度は十分に有しているが、屋外での X 線検査を考慮した場合、常時、最高出力での計測を行う事は、放射線管理の面からも好ましくないケースも考えられる。これは橋梁周辺の X 線管理に対する問題であり、必要最小限の線量強度で検査を実施することが望まれる。現状の装置は、検査技術及び検査能力の開発・確認に重点を置いたシステム構成であり、柔軟な X 線強度調整の機能をさらに向上させる必要がある。このため、様々な橋梁の検査現場適



(a)



(b)



(c)



(d)

図 17 日本初の 3.95 MeV 電子ライナック X 線源の屋外橋梁透視試験 (土木研究所)⁴⁾
(a) 橋梁切り出し試料. (b) X 線源ボックスと高周波源ボックス. (c) X 線フラットパネルカメラ. (d) フランジ部 (厚さ 400 mm, 測定時間 30 s)

用を想定すると、X 線出力強度の調整能力を改良する必要がある。必要な改良を行った後、屋外の検査対象橋梁試験エリアにて、短時間の X 線撮像とダイナミックレンジを広くとった X 線撮像試験を行い、その有効性を確認する。

7.2 X 線検出システム

X 線を用いた非破壊検査の原理は基本的に医用イメージングと同じであり、違うのは検査対象物の厚みと X 線のエネルギーである。図 1, 2 で示

すように、我々は従来の X 線管よりも高いエネルギーの X 線が発生可能な小型の電子加速器を開発してきており^{3,4)}、実際にこれまで 950 keV, 3.95 MeV, 6 MeV の可搬型の電子加速器の開発に成功している。このように発生する X 線のエネルギーが高くなるに伴い、検査対象物も 1 cm 厚の配管から、3 cm 厚の配管、1 m 厚のコンクリートまで広げることが可能になる。しかし、進化する X 線源に対し、X 線を可視化する検出器の方は依然従来と同じものが使われており、高エネルギー X 線発生装置の性能を十分に活かしきれていないのも現状である (図 18)。

主な理由は、加速器から発生する X 線のエネルギーが X 線管に比べ 1 桁以上高いため、X 線フィルムやフラットパネルディテクタと呼ばれる従来の検出器では X 線検出効率が著しく低下するためである。例えば現在フラットパネルディテクタで用いられている 200 μm 厚の GOS シンチレーターでは 400 keV の X 線に対する検出効率は 0.1% しかない。

言い換えると、加速器を利用した非破壊検査をより有効なものにするには、検出器の高エネルギー X 線に対する感度を向上させ (検出器を厚くすること、高比重化すること)、且つそれが空間分解能を維持したまま実現可能な新技術の開発が求められている。また、X 線非破壊検査では医療用のガンマ線検出器などは単純には転用できない。その理由の一つが加速器のデューティーサイクルである。加速器から発生する X 線は連続で X 線管を発生可能な X 線管と違い、短時間にま

とまった X 線が大量に発生するため従来のパルスカウンティングと呼ばれる手法では信号を捌ききれず、従来の考え方とはまったく違うアプローチが求められる。そこで、前述の検出効率の問題と関連するが、高エネルギー X 線を用いた非破壊検査では検査対象物内部で X 線が散乱することにより画像が不鮮明になる散乱線の影響も考慮すべき課題となる。

その解決策として、従来の概念とは異なる奥行き方向にシリコン素子を配置した検出器と、エネルギー弁別型のカウンティング回路と組み合わせることでアクティブ・パッシブの両アプローチから高エネルギー X 線の検出に特化した検出器が有用であると我々は考えている。

シリコンは高エネルギーの直接 X 線に比べ散乱線に対しての感度が低く、パッシブに散乱線感度を抑えるのに有効である (図 19)。

その他にも現場で利用するためには検出器の設置スペースは限られていることが多く、検出器が小型であること、そして無線であること、リアルタイム性があること、また、検査対象物によって透過してくる X 線量のレンジは広いいため、広いダイナミックレンジを持っていることなどが開発

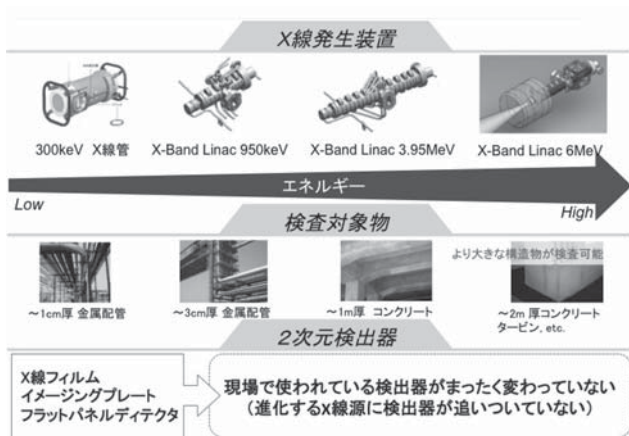
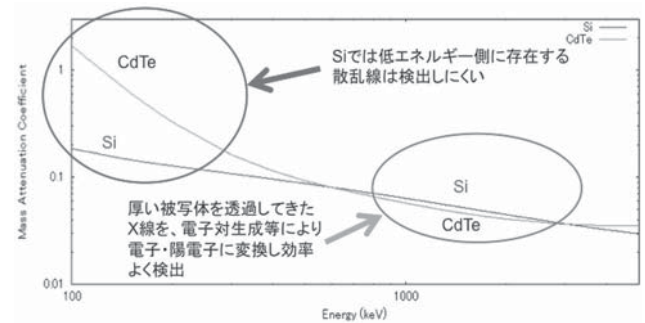
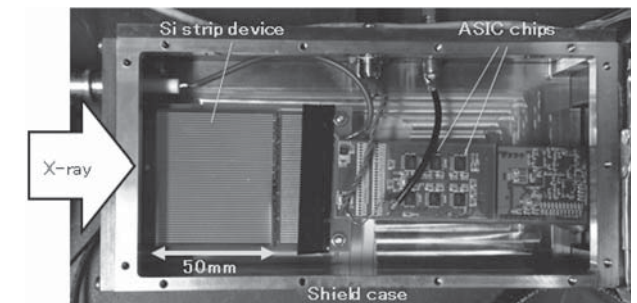


図 18 X 線源と検査対象物、検出器の関係⁴⁾



(a)



(b)

図 19 CdTe とシリコンの質量減弱計数の比較 (a) と高エネルギー X 線用シリコンシンチレーターカメラ開発 (b)⁹⁾

要項として挙げられる。

7.3 3次元内部構造情報と構造健全性評価

橋梁検査について、RC 橋にて外径 10 mm 以上の鉄ロッド、PC 橋にて外径 7 mm の鉄ワイアの、主に水による腐食による断面変化を 1 mm 程度精度で評価したい。また橋全体の構造強度劣化の評価のために、所定の箇所周辺の長さ方向に 2 m 程度含めた部分の 3 次元内部情報の取得が期待されている。内部構造の 3 次元再構成には、X 線 CT と Tomosynthesis が活用できる。しかし実橋梁現場で、橋桁周辺に X 線源と検出器を 360° スキャンすることは不可能である。限定された角度でのスキャンにて、上記空間分解能での内部構造の測定を実施しなければならない。今現場で部分角度 CT を実施するために駆動システムを検討している。並行して実験室にて、実橋から切り出した試料を使って、360° スキャン CT/Tomosynthesis と、部分角度スキャン・数方向透視画像取得を実施し、校正データベースを作成中である。現場での後者のような限定された取得情報から、内部構造を迅速かつ適切に評価できるようにする。

8. ま と め

小型の X バンドライナックを採用することにより、可搬型の高エネルギー・高出力 X 線発生装置を実現できる。これにより、これまでは困難とされてきた産業インフラや社会インフラへの X 線非破壊検査の適用が可能になった。今後はこれまでの成果を基に、さらに X 線発生装置の改良を行い、非破壊検査の現場での運用性を向上させていく。また、産業インフラや、3.95 MeV X 線発生装置の使用実績を積み重ねていき、本年度中に実橋による実証試験を開始する。このように現場での実証試験を積み重ねていき、X 線源・検出・駆動・信号処理のシステムの改良に取り組み、新しい原子力の社会貢献の実績として発信していきたい。

謝 辞

研究を進める上で多大なる協力を頂きました (株) 関東技研 小野洋伸氏、(株) XIT 小石川篤氏、村田健太郎氏、(株) AXION-JAPAN 櫻井栄男氏、

法政大学 尾川浩一先生、貝吹太志先生に、心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) A. Takeshita, M. Uesaka, T. Watanabe, M. Yamamoto and N. Kaneko, "Study of the 100fs 10kA X-band Linac", Nuclear Instruments and Methods, A, Vol. 421 (1999), pp.43-53.
- 2) F. Sakamoto, M. Uesaka, Y. Taniguchi, T. Natsui, E. Hashimoto, L.K. Woo, T. Yamamoto, J. Urakawa, M. Yoshida, T. Higo, S. Fukuda, N. Kaneko, H. Nose, H. Sakae, N. Nakamura, M. Yamamoto, "Compton sources for X/ γ rays: Physics and applications", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Vol. 608, S36-S40 (2009).
- 3) Mitsuru Uesaka, Takuya Natsui, Kiwoo Lee, Katsuhiko Dobashi, Tomohiko Yamamoto, Takeshi Fujiwara, Haito Zhu, Kazuyuki Demachi, Eiji Tanabe, Masashi Yamamoto, Naoki Nakamura, Joichi Kusano, Toshiyasu Higo, Shigeki Fukuda, Mitsuhiro Yoshida, Shuji Matsumoto, "950 keV, 3.95 MeV and 6 MeV X-band linacs for nondestructive evaluation and medicine", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Volume 657, Issue 1, 21 November 2011, pp. 82-87.
- 4) Mitsuru Uesaka, Katsuhiko Dobashi, Takeshi Fujiwara, Cuixiang Pei, Wenjing Wu, Joichi Kusano, Naoki Nakamura, Masashi Yamamoto, Eiji Tanabe, Seiji Ohya, Yukiya Hattori, Itaru Miura, Hidetaka Honma, "On-site nondestructive inspection by upgraded portable 950keV/3.95MeV X-band linac x-ray sources", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 47 (2014) 234008 (9pp).
- 5) 大矢清司, 服部行也, 上坂充, 草野譲一, 三浦到, 小野洋伸, 平成 27 年度非破壊検査総合シンポジウム (日本非破壊検査協会) 講演要旨集.
- 6) 三浦到, 上坂充, 草野譲一, 服部行也, 小野洋伸, "X 線動画撮像技術による化学プラント装置内部流体の可視化", 検査技術, 日本工業出版, 2015 年 9 月号 (2015).
- 7) 藤原健, 上坂充, 田辺英二, 草野譲一, "高エネルギー小型可搬型 X バンドライナック用検出器", 検査技術, 日本工業出版, 2013 年 2 月号 (2013).
- 8) 大矢清司, 服部行也, 上坂充, 草野譲一, 三浦到, 小野洋伸, "可搬型 950keV 高エネルギー X バンドライナック X 線源の開発と産業プラント設備への適用", 非破壊検査, 日本非破壊検査協会, 2015 年 5 月号 (2015).
- 9) 藤原健 他, 2015 年物理学会第 70 回年次大会, ビーム物理領域, 実験核物理領域, 領域 1 合同シンポジウム.