

原子力復旧・防災のための高エネルギーX線検査システムの開発

受託者 国立大学法人東京大学
 研究代表者 高橋 浩之 大学院工学研究科
 再委託先 国立大学法人名古屋大学、富士電機株式会社
 研究開発期間 平成24年度～26年度

1. 研究開発の背景とねらい

本課題では、原子力関連施設の復旧・防災の観点から、最新の持ち出し可能な高エネルギーX線源（3.95 MeV X-Band ライナック）を用い、原子炉・原子炉周辺の構造物を対象として大型構造物の非破壊検査を行うために、高エネルギーX線に特化したX線検出器（X線カメラ）の開発を行うことを目的としている。

近年、東京大学で開発された可搬型 3.95 MeV XバンドライナックX線源は、1 m厚のコンクリート壁や 30 cmの鋼材に対してX線非破壊検査に十分な透過力を持つエネルギーの高い MeV オーダーのX線を発生することが分かっている。この高エネルギーX線発生装置の可搬性を利用し、実際に現場での 1 m厚の RC 壁、PC 壁内部の亀裂や、鋼材残存形状等を高エネルギーX線非破壊検査で取得し、そのデータから力学（定量）的に構造安全性を評価できるシステムが開発できれば、原子力関連施設の健全性評価を効果的かつ迅速に行うことが可能となる。しかし、1 m厚のコンクリート壁を透過する 2 MeV の高エネルギーX線に対し、既存のX線検出器は検出効率が 0.1%以下と非常に低いため、高エネルギーにX線に対し十分な感度を持つ検出器が不可欠となる。本研究では高エネルギーX線に対し 10%以上の検出効率を持つ高エネルギーに特化したX線検出器の開発を行う。

本研究で開発を行うのは 3.95 MeV Xバンドライナック高エネルギーX線源を用いたスクリーニング検査用の大面積2次元X線カメラである。高精度な分析を行うには透過してくる高エネルギーのX線に対し高い検出効率を有しつつ、散乱線をいかに抑えるかが課題となる。そこで本研究ではシリコンを用いた奥行き方向に素子を配置し、検出効率を向上させた積層型シリコン検出器とタングステンコリメータを組み合わせ、高検出効率のピクセルアレイ型X線検出器を開発する。

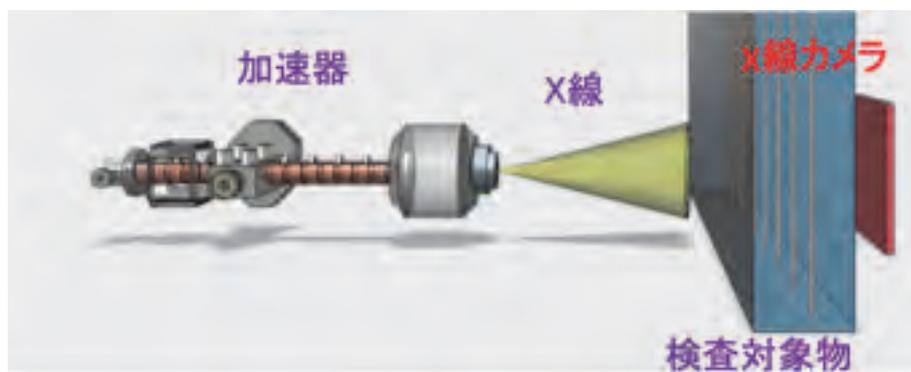


図 1. 加速器と非破壊検査の概念図

2. 研究開発成果

2.1. 専用集積回路の開発

本研究で開発する多チャンネル型の放射線検出器では、その膨大な数の検出器の信号処理が大きな課題となる。多信号出力検出器から高密度の信号を読み出すためには、読み出し電子回路の

簡素化が重要であり、回路構成を小さく保ちながらも、透過X線と散乱線の分離において有効な波高分析などの機能を実現し、透過X線信号と散乱線信号を弁別する必要がある。現時点でもっともシンプルに波高分析を行う手法としては、各信号読み出し回路の各々に、コンパレータを設置して、波高値を時間幅に変換して読み出す Time over Threshold (ToT)法があり、これを用いることで、信号処理回路のコストを抑えながらも、高い読み出し性能を実現することができるものと期待される。一方、従来の ToT 方式ではリニアリティが悪くダイナミックレンジが低いため、この点における改善が必要である。本研究では、しきい値を信号に合わせ可変とする動的閾値を用いた新しい ToT 方式により、従来手法の欠点であったリニアリティの改善、ダイナミックレンジの高度化に取り組んだ。

本年度は64チャンネルdToT回路(TSMCの0.25umプロセス)を使用して新しいASICを設計し、試作した。チャージセンシティブアンプ(CSA)と、極零相殺を有すると波形整形回路と論理回路二単安定マルチバイブレータで動的閾値変更する比較器と、タイミング発生回路からなる。CSAは、フォールディングカスコード回路を有する。整形アンプは通常の2段増幅器を持っている。帰還抵抗とキャンセルを形成し、極 - 零用抵抗は、Siウエハの大面积を無駄にすることなく、複数のメガオームを得るために、CMOS抵抗回路で構成されている。抵抗器は、回路のダイナミックレンジと抵抗回路は、CMOSトランジスタの線形領域を利用したピンを我々が関心のある周波数帯域内のシミュレーション結果を満たすために、正確なガウス波形に対して一定の値を維持しなければならない。本年度は可変抵抗を加えた回路基板を試作し、64チャンネル回路システムの評価を行った(図2)。また、実際に50chのシリコン検出器基板とASICを接続し、試作器を組み上げた。図3に試作器の内部を示す。

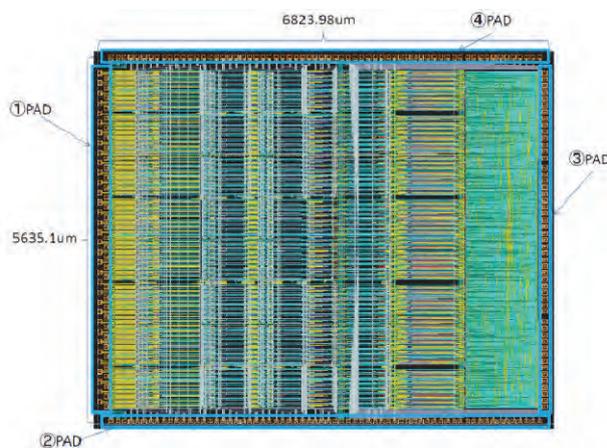


図 2. チップ全体のレイアウト

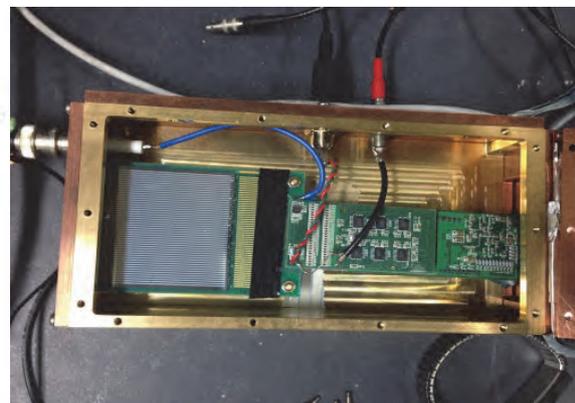


図 3. 試作器内部

また、試作したシリコン検出素子の特性を評価し、X線検出素子として必要なダイオード特性(I-V特性)と静電容量特性(C-V特性)が得られている事を確認した(図6, 図7)。ダイオード特性に関して、逆方向リーク電流:【平均 10.2 nA/60 V/25 °C】、【平均 118.2nA/60V/55°C】、また静電容量に関しては【平均 17.7 pF/30 V/25 °C】【平均 13.4 pF/60 V/25 °C (換算)】という結果が得られており、ASICと組み合わせるのに十分な特性を持っていることが分かった。²⁴¹Amのガンマ線で試作素子を評価した結果、ガンマ線応答特性を評価した結果、ガンマ線・X線検出器として正常な動作が確認できた。さらに、図3に示した試作器で、タングステン製コリメ

ータのイメージングを行った。線源には 662keV のガンマ線を用いた。その結果を図 4 に示す。加速器から出力される 400keV 以上の X 線に対し、十分な感度と撮像能力があることを示せた。

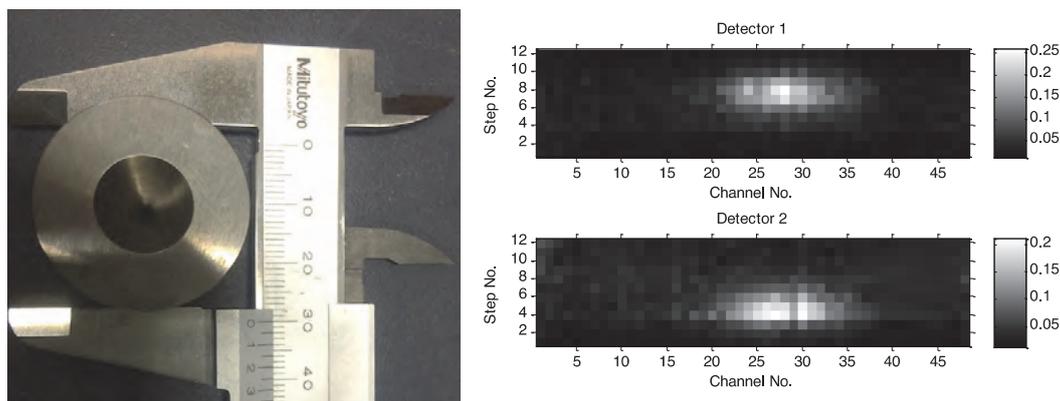


図 4. 撮像したタングステン製コリメータ (左) と Cs-127 線源での撮像結果 (右)

また、3.95MeV ライナックを用いて、試作器の動作試験も行った。シリコンストリップ検出器は 85 センチメートル厚手のさらなる厚いコンクリートブロックを通して照射した (図 5 左)。この時、線量率は、250~260 mGy/min とした。典型的な観測されたパルスは、波形例に示す (図 5 右)。またその時の実験の様子を図 3.1.4.13 に示す。主信号は、直接 X 線ビームからの散乱 X 線によるものであった。照射量は 17-21mGy/min ごろ。典型的な観測されたパルスは、波形例に示されている (図 3.1.4.8)。ライトグリーン曲線はプリアンプパルスからだった、モスグリーン曲線は、高速成形し、増幅器を介して取得した。プリアンプ out は別のイベントとパイルアップパルスを示している。近隣のイベントが明確に 100ns の時間を形作ると分離されていない。今回得られた結果を元に、パルスの時定数を 50~80ns で整形した場合、3 分の測定のためのダイナミック・レンジを推定するものとする。前提として、4 パルスが 4 μ s で取得され、100 PPS 繰り返し率、3 分測定とする。その場合、1 分間の最大数は 4 \times 100 \times 60 \times 3=72000 である。この値は、16 ビットのカウンタで測定可能な値であり、それは正常時における X 線撮影分析のために十分であると考えられる。

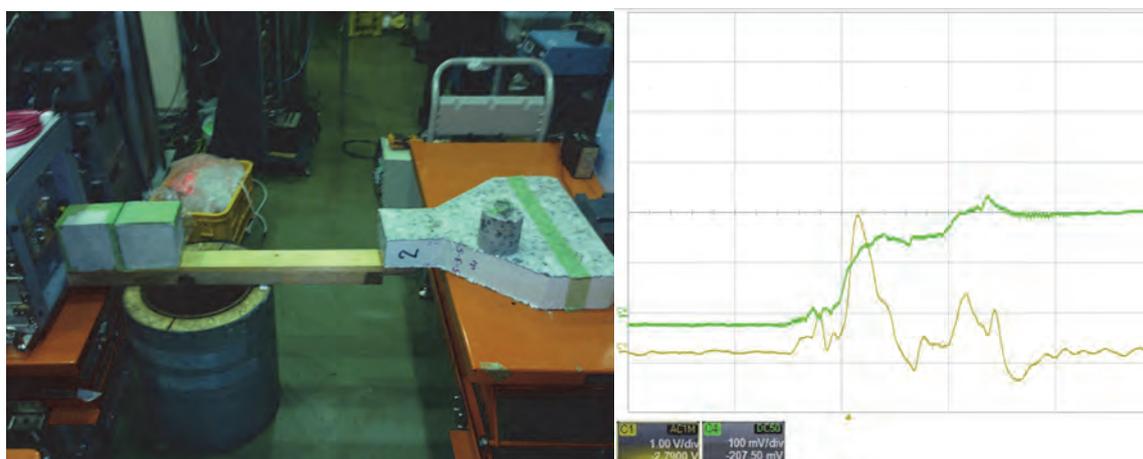


図 5. 3.95MeV ライナックを用いたセットアップ体系 (左) と観測された波形 (右)

2. 2. 散乱 X 線除去のためのコンバージングコリメータの開発

X線透過画像の画質を劣化させる要因である散乱X線はほとんどコンクリートによる散乱X線であり、この散乱線を効率よく除去するコリメータの開発が不可欠である。高効率で、一様性の高いコリメータを設計するために、コンピュータシミュレーションを用いた設計を行っている。コンクリートサンプル、配管サンプルの透過X線のエネルギースペクトルに適したコリメータの材質と形状を検討した。

本年度は、コンクリートサンプル、配管サンプルの透過X線のエネルギースペクトルに適した高効率で一様性の高いコリメータを、コンピュータシミュレーションを用いて最適設計し、タンダステン合金を用いたコリメータを試作した。試作したコリメータが適切に機能しているかを線量分布評価システムにより予備的評価を実施した。図6に試作したコリメータと、線量分布評価システムで撮像評価した結果を示す。

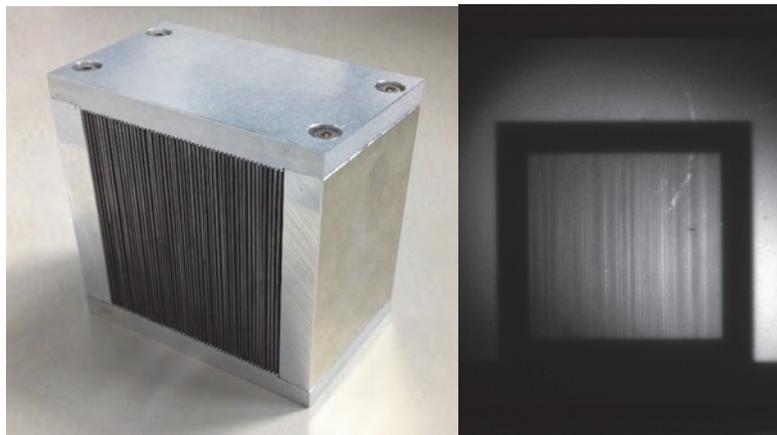


図6. 焦点距離 500mm のコリメータ (左) と取得画像 (右)

焦点距離 500mm のコリメータを、線源から 475mm の位置に配置し、試作した線量分布評価システムで線量を評価した結果、設計通りの十分な一様性があることが示せた。

3. 今後の展望

本課題の3年目の途中段階として所期の目標を達成し、研究計画に基づき研究開発を実施中である。シリコンの散乱線（低エネルギーのX線）に対し低感度で、1 MeV以上の高エネルギーX線に対し高感度である利点を活かしつつ、高エネルギー2次元のX線カメラを実現する。目標達成の鍵となる、専用集積回路の設計については完了したので、今後、回路と素子を組み合わせ、検出器としての最終的な形として組み上げを行う。

4. 参考文献

- [1] T. Orita, et al., “A new pulse width signal processing with delay-line and non-linear circuit (for ToT),” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 648, pp. S24–S27, Aug. 2011.
- [2] H. Takahashi, et al., “Development of a glass GEM,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, vol. 724, pp. 1–4, Oct. 2013.
- [3] T. Fujiwara, S. Tanaka, Y. Mitsuya, H. Takahashi, K. Tagi, J. Kusano, E. Tanabe, M. Yamamoto, N. Nakamura, K. Dobashi, H. Tomita, and M. Uesaka, “Development of a scintillating G-GEM detector for a 6-MeV X-band Linac for medical applications,” Journal of Instrumentation, vol. 8, no. 12, pp. C12020–C12020, Dec. 2013.