

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こととした。

本研究においては 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線カメラの開発を行った。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。そこで本研究では従来は検出器に垂直方向に入射させていたX線を検出器の真横から入射させることで奥行きを稼ぎ、高い効率とすることとした。また、検出器材料としては材料としての完成度の高いシリコンを用い、大きな信号を得て、各個のパルス信号のエネルギー情報により、目的とする高エネルギーX線からの信号のみを選別すること、また、散乱線の影響を CdTe などの化合物半導体よりも受けにくくすることなどを勘案してシリコンを積層型として用い、タングステンコリメータを組み合わせ、高検出効率の光子計数型のピクセルアレイX線検出器を開発することとした。

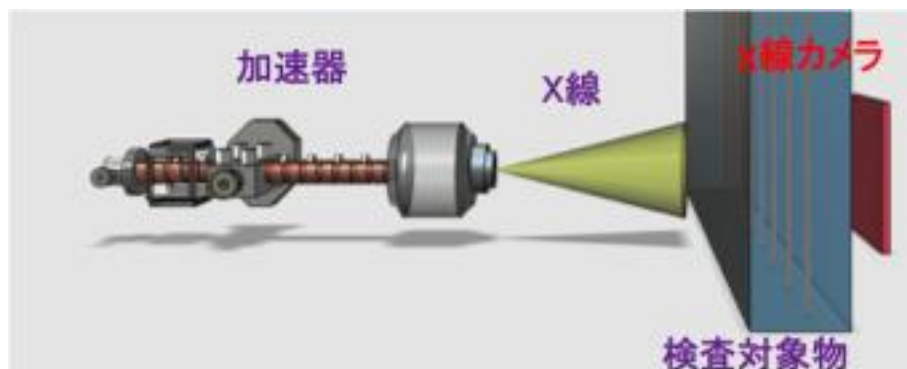


図1. 加速器と非破壊検査の概念図

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においては、検出器の各ピクセルごとに波高分析を行い、パルス計数を行うために、膨大な数の電子回路を必要とする点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。回路規模を小さくしながらも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) 法がある。本手法ではフロントエンド部においてパルス幅に波高値情報を載せた直接デジタル信号が得られ、FPGA などのロジック回路を用いてパルス幅を分析することで波高値分析が手軽に行える。したがって、これを多数集積した専用集積回路を用いることで、信号処理回路のコストを抑えながらも、各ピクセルごとに散乱線を除去する機能を持たせ、目的とする X 線からの信号のみを計数するという、高い読み出し性能を実現することができると考えられる。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、この点においては多少工夫が必要である。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 方式の ASIC を開発し、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も取り組んだ。

具体的には、本研究では 64 チャンネル ToT 回路 (TSMC の 0.25 μm プロセス) からなる ASIC を設計・試作し、その特性の確認を行った。プリアンプ、波形整形回路、コンパレータ、信号検出後動的閾値を発生する回路、タイミング発生回路からなる。プリアンプは、フォールディングカスケード回路を用いた。整形アンプはポールゼロ補償回路をもたせた。高抵抗回路は、トランジスタを用いて実現し、図 2 に示すような回路構成の ASIC について評価を行った。評価にはテストチャンネルを利用して、図中に示した Test x-1, x-2, x-3 の各信号波形を観測した。図 3 には、本研究で対象とする MeV 領域の X 線パルスにより検出器に生成される 10fC の信号を入力した際の波形整形後のパルス信号を示す。良好な S/N 比で信号パルスが処理されていることがわかる。

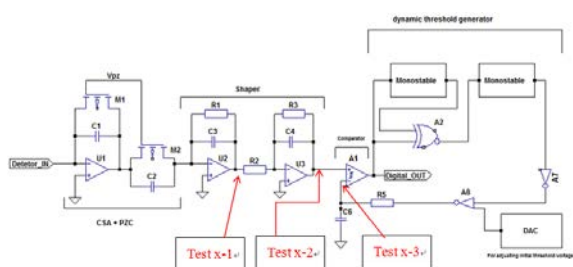


図 2. チップの各チャンネルの構成

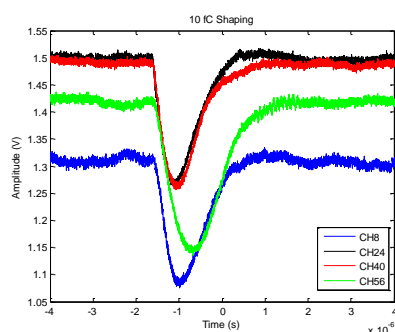


図 3. 波形整形後のパルス信号

2.2. シリコンストリップ検出素子の開発

本研究においては、低コストで多数のシリコンストリップ検出器を製作し、積層するという考え方に基づくために、1次元の構成でパルス信号が各ストリップごとに得られる検出素子を独自に開発した。本素子は富士電機のシリコン線量計の技術を応用し、P型のウエハー上に a-Si を堆積させることで実現した。本シリコン検出素子の特性を評価し、100V 以上の逆バイアスで動作さ

せることが可能であることを確認し、150Vの逆バイアスでは、全空乏層化が達成されている。また、リーク電流は数 nA のレベルであり、本研究における検出素子として必要なパルス計測ができることを確認した。図4には、製作した検出素子の写真を示す。0.5mm厚50mm角の検出器に1mmピッチで0.5mm幅の読み出しストリップ電極を形成したものである。実際にCo-57線源を用いて検出器全面に照射をした際に得られた波高分布を図5に示す。エネルギー分解能は2.9keV(FWHM)と良好な値が得られている。

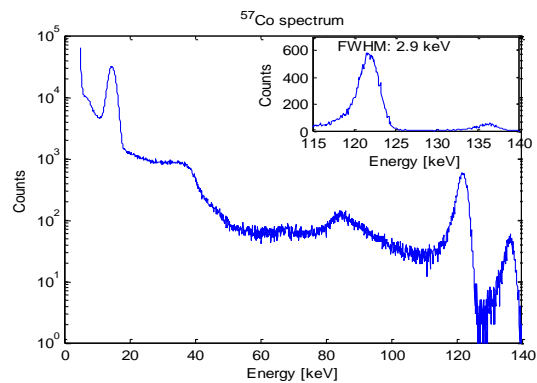
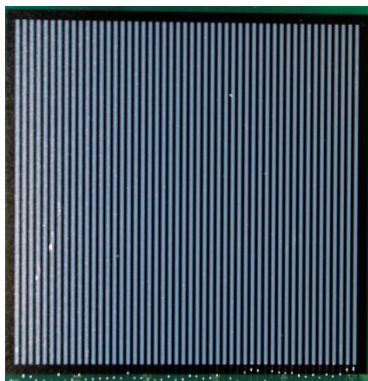


図4. 試作したシリコンストリップ 図5. Co-57により得られた波高分布

^{241}Am のガンマ線で試作素子を評価した結果も同様に良好な波高スペクトルが得られており、検出器の動作を確認した。

2. 3. 散乱X線除去のためのコリメータの開発

X線透過画像の画質を劣化させる要因として散乱X線がある。本研究では検出器自体に低エネルギーの散乱線を除去する機能をもたせているが、実際の現場においては、種々の散乱要因が考えられ、コリメータを利用することにより、高品位なX線画像の取得が可能であると考えられる。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い、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、タング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ことを線量分布評価システムにより確認した。図6に試作したコリメータと、焦点距離500mmのコリメータについて線量分布評価システムで撮像評価した結果を示す。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すことができた。

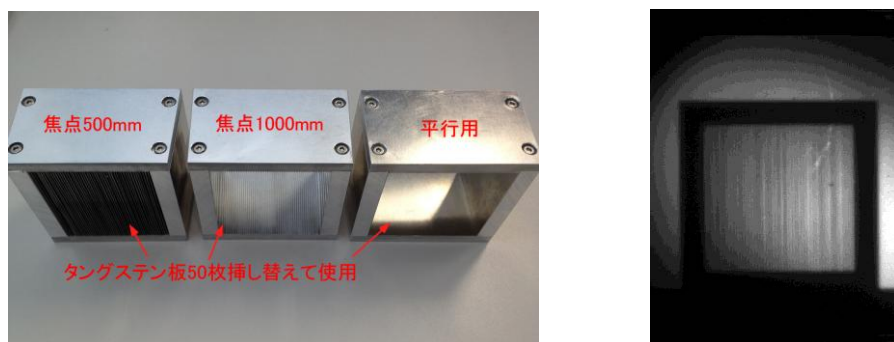


図6. コリメータの写真(左) とコリメータにより得られる線量分布(右)

一方、コンバーGINGコリメータの実際の適用に際しては、コリメータ単独ではよくとも検出器のピクセル形状とのマッチングがあるので、あまり短い焦点距離では検出器自身の配置も平行ではなく線源を見込むように配置する必要があることが詳細な計算から明らかになった。

3. 検出器システムのイメージング試験

開発した検出器をスタックして図7に示すようなモジュールを製作し、これを用いたイメージング試験を行った。モジュールはシリコンストリップ検出器、ToTパルス信号処理回路、FPGAによるデジタル信号処理回路を1つの基板にまとめ、これらをスタックした構造になる。位置分解能はCs-137線源を用いて鉛板のエッジ部分で評価した結果1mm(rms)となった。本モジュールを用いて、950keV X線および3.95MeV X線によりイメージングの試験を行い、高い検出効率で散乱線の影響の少ない良好な画像が得られることを確認した。図8は本モジュールと950keV X線源を用いて測定した画像の例である。ここではタングステンの構造体のイメージングに成功している。一方、ライナック X線は大電流のRFを用いるために、その雑音からのシールドが重要である。試験においては、検出器部分に二重シールドが有効であることが分かった。



図7. モジュールの写真

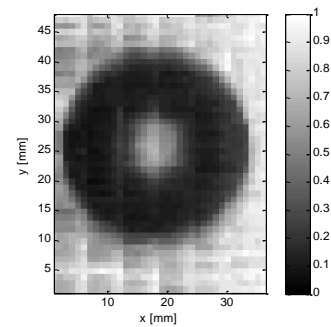


図8 タングステン試料(左)とX線画像(右)

4. 結論

本研究では、検出器にシリコンを用い奥行き方向で検出効率を稼ぐことやX線の光子計数と各ピクセルごとの波高分析を行うなど、従来の非破壊検査用検出器の常識を覆すような研究開発を行ったが、その成果は十分高いレベルで得ることができたと考えている。今後は本手法の実用化を図り、さまざまな応用に対して有用な検出器を提供していくこととしたい。

5. 参考文献

- [1] 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.
- [2] X.Yan, Y. Tian, K. Shimazoe, T. Fujiwara, H. Takahashi, “Development of X-ray/Gamma Ray Imaging System Based on Hydrogenated Amorphous Silicon/Crystalline Silicon Heterojunction Strip Detector”, *Radioisotopes*, to be published.