

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

研究代表者 高橋 浩之 国立大学法人東京大学大学院工学系研究科
 参画機関 国立大学法人東京大学、富士電機株式会社、国立大学法人名古屋大学
 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

本事業では、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 (図 1, 表 1)。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



図 1 可搬型 3.95 MeV 加速器の外観

表 1 3.95 MeV 加速器のパラメータ

	加速管	高周波源
重量 (kg)	80+62 (コリメータ+加速管)	62
各パラメータ	電子銃出力電流 300mA	周波数 9.3 GHz
	電子銃電圧 20 kV	パルス幅 4 μs
	ビーム電流 100 mA	繰り返し 200 pps
	出力 3000 kW	

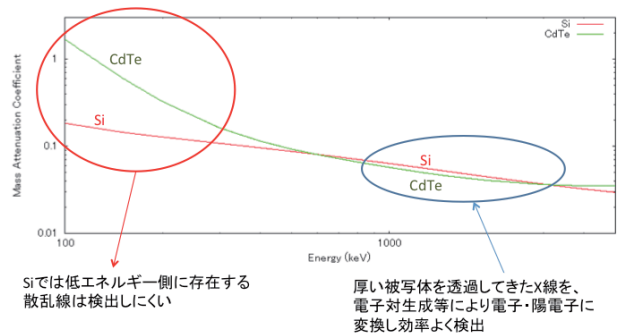


図 2. Si 検出器と CdTe 検出器の比較

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ディテクターを開発する（図2）。

2. 研究開発成果

2.1 サブテーマ1：高エネルギーX線検査システムの開発

(1) 専用集積回路の開発

高エネルギーX線による信号のみを、多チャンネルシステムでも効率よく処理できるよう、Time over Threshold 法を用いたパルスカウンティング用集積回路(ASIC)を設計・試

作するとともに、その性能の分析・評価を行った[1]。今年度は、前年度に試作したプロトタイプを元に一様性などを向上させた設計を行い、64チャンネルのASICをTSMC社の0.25 μ mプロセスを用いて試作を行った。図3にIC設計ツールを用いて設計した64チャンネルASICの設計レイアウトを示す。

(2) データ取得システムの開発

マルチチャンネルの放射線信

号を高速に処理し、高速でデータ取得系に伝送するためハードウェアを高性能ロジックデバイス（FPGA）を用いて作成する。本年度は平成24年度に作成したFPGAによる高速なアナログ・デジタル変換回路を、アレイ化し、USBでデータが取得できる伝送システムの設計を進めている。また、伝送時のデジタル信号によるノイズが、アナログASICに影響しないよう、FPGA用基板の設計・配置・ケーシングについて改良を進めている。

(3) シリコン検出素子の開発

高精細なイメージングにはシリコンウェハの均質性が非常に重要になるため、シリコンウェハの試作と分析・評価を行った。さらに、試作したシリコンウェハを加工してシリコン検出素子に仕上げ、3.95 MeV ライナックビームを用いて評価す

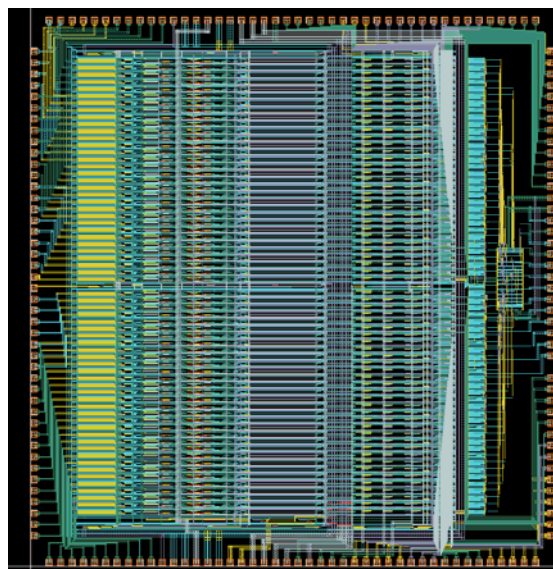


図3. 64 ch ASIC の設計レイアウト

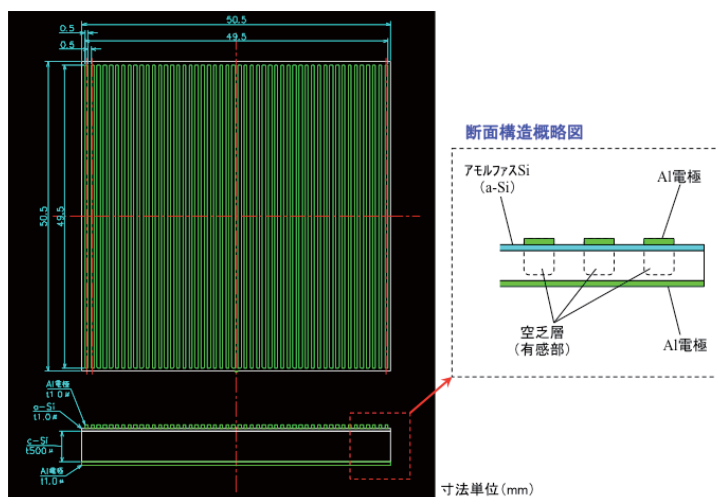


図4. Si ストリップ検出素子の設計図と概念図



図5. 試作したSi ストリップ素子の外観

る。図4, 図5に試作したSiストリップ検出器の概要と外観を示す。

(4) シリコン検出素子の特性評価

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。また、²⁴¹Amのガンマ線で試作素子を評価した結果を図8, 図9に示す。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。

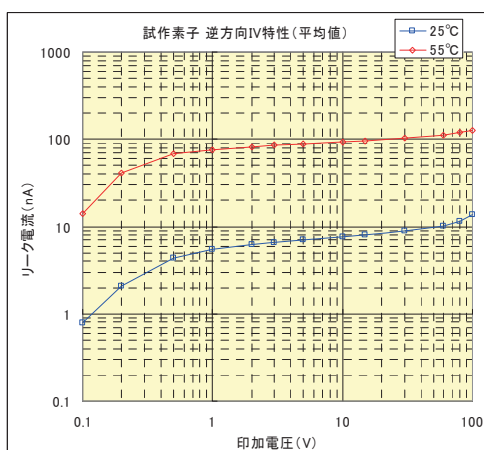


図6. 試作素子の I/V 特性

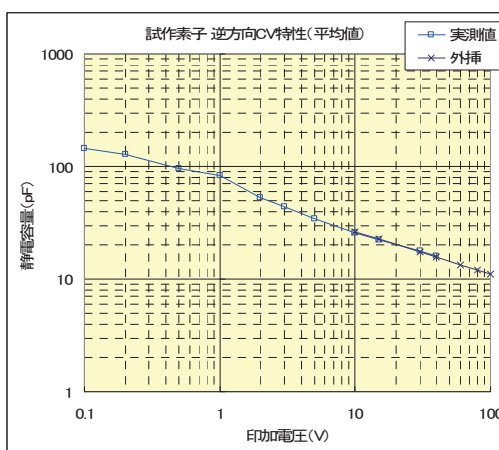


図7. 試作素子の C/V 特性

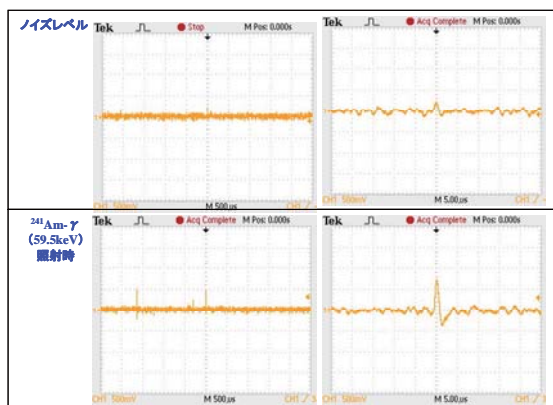


図8. Am-241 ガンマ線照射結果

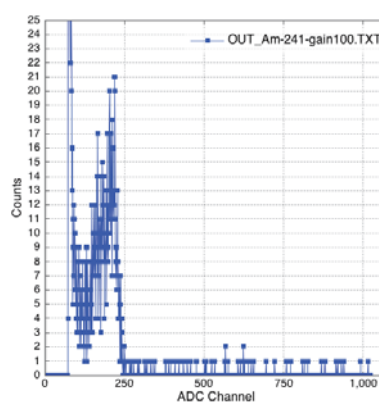


図9. Am-241 ガンマ線照射結果

(5) 3.95 MeV ライナック線源の特性評価

3.95 MeV Xバンドライナックの性能評価に関し、発生するX線、透過するX線、散乱するX線の成分について、シミュレーションで詳細な分析を実施し、シリコン検出素子を用いて3.95 MeV Xバンドライナックの応答特性を評価した結果、一般的に高エネルギーX線に有利と言われているCdTe素子よりもSiストリップ素子の方が、3.95 MeV XバンドライナックからのX線に対し、優れた応答特性を示すことが分かった。

(6) 6 MeV以上ライナック用検出器の試作・検討

福島第一原子力発電所の格納容器の健全性評価を行うためには、加速エネルギーが3.95MeVより高い6 MeV以上のライナックが必要になることから、発生するさらにエネルギーの高いX線用

に、光電子増倍管とシンチレータを組み合わせた検出器の試作・検討を行っている。

2.2 サブテーマ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。

(1) コリメータの設計検討

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、タングステン合金を用いたコリメータを試作する。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する。コリメータについては加工性と遮蔽性からタンタルが材質として適しているという結論に達した。

(2) 線量分布評価システムの開発

設計したコリメータの性能を評価するために、線量評価用の一様性の高い2次元放射線検出器をHOYA社製の感光性ガラスを用いて製作した[2] (図10)。ガス検出器の電圧印加には安定した高圧が印加可能な2連高圧電源を用い、ガスにはPrガスとNe-CF₄ガスを用いた。

本研究で使用したGlass GEMでは感光性のガラス基板を用いている。感光性であるためフォトリソグラフィによって高精度な孔を作成することが可能となる。またガラス素材であることによりGlass GEMには硬度がありたわみにくい。これは取り扱いの難しさの問題に対する解決策となる。加えて、ポリイミドに替えて無機材料であるガラスを使用しているためアウトガスは発生せず、長時間の密封状況での動作などにも適していることになる。

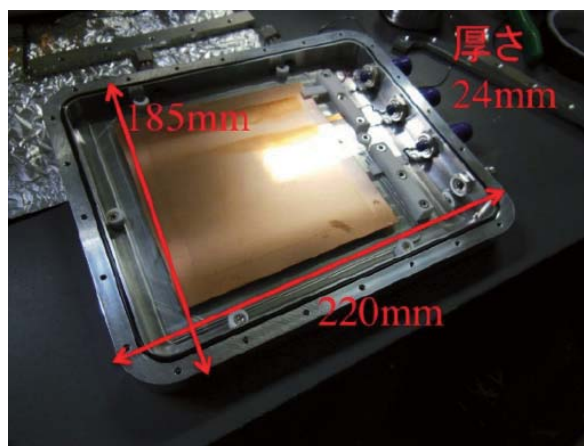


図10. 線量分布評価システムの試作器

3. 今後の展望

事業の2年目として所期の目標を達成し、3年目の計画を実施中である。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改良を進め、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.