

**研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム**  
**産業ニーズ対応タイプ 完了報告書(公開版)概要**

技術テーマ	:コンパクト中性子源とその産業応用に向けた基盤技術の構築
研究課題名	:中性子フラットパネル型検出器の開発
プロジェクトリーダー	
機関名	:国立大学法人 東京大学
氏名	:高橋 浩之

## 1. 研究の目的

本研究では、中性子デジタルラジオグラフィの高度化と中性子3D CT を小型中性子源にて可能にするために、大面積中性子フラットパネルディテクタを開発する。中性子ラジオグラフィはX線ラジオグラフィと類似した放射線透過検査法であり、透過特性の違いによりX線ラジオグラフィと相補的な情報が得られる。中性子ラジオグラフィは数ある中性子利用法の中でも、最も広く実用的に利用されている手法であり、今後全国的に広まりつつある小型中性子源での産業利用が特に期待される手法である。利用されている分野としては近年利用が急増している燃料電池内部の可視化や、原子炉燃料の健全性評価、宇宙ロケット部品の全数検査、エンジンノズル等の試験検査、航空機エンジンを始めとする各種タービンブレードの検査、内燃機関内の燃料の輸送状況観察等が挙げられる。そこで本研究は、中性子デジタルラジオグラフィを小型中性子源でも使用可能にするために高効率・大面積の中性子フラットパネルディテクタを開発する。

## 2. 研究成果の創出状況

マイルストーン	達成状況
(1) 有感面積 10cm <sup>2</sup> を実現できるボロンコンバータのスパッタリングプロセスを用いて開発する。開発したコンバータを実際に中性子ビームを用いて評価する。(平成 29 年度末)	有感面積 10cm <sup>2</sup> を持つボロンコンバータと電子増幅型ガスシンチレータを組み合わせ、理化学研究所の小型化中性子源を用いてイメージングの評価を行い、小型中性子源での簡便なイメージングを実証できた。
(2) ガスシンチレータを用いたイメージング装置をカメラと組み合わせ製作し、最適な電圧値とガス圧についての条件を探索する。また X 線イメージングの結果と固体シンチレータとの結果を比較することで、ガスシンチレータを利用したイメージング装置の有用性を確認する。(平成 28 年度末)	ガスを用いることで優れたイメージング特性と低ガンマ線感度が得られることを実証でき、これらの成果について学会発表と論文発表を行った。内容としては、有感面積 10cm <sup>2</sup> の電子増幅型ガスシンチレータを製作し、冷却型 CCD を用いた撮像系を構築してマイクロフォーカス X 線を用いた試験を行った。高い分解能の X 線画像が得られ、優れた電子増幅型ガスシンチレータとして動作していることを確認した。

<p>(3) 有感エリア 10cm□大面積受光素子パネルの設計・製作し、評価する。(平成 28 年度末)</p>	<p>10cm□の有感面積を持つ密着型受光素子パネルの評価環境を構築した後、ピクセルサイズを 200<math>\mu</math>m とし、有感領域を 512<math>\times</math>512 のアレイとして読み出しを行う大面積受光素子パネルの設計・試作を行った。試作品の評価の結果、可視光での画像取得に成功したので、電子増幅型シンチレータに密着させて、X 線画像の測定に成功した。</p>
<p>(4) 検出器((受光素子)を高感度化する。(平成 29 年度末)</p>	<p>産学共創の場を通じて、中性子の測定に要求される仕様は測定環境や測定対象により異なり、本研究の目指す最終的な性能を満たす前段階でも十分に実用に供する性能が得られることが分かってきた。そこで当初計画から前倒して大面積受光素子パネルの高感度化を実施することとした。これにより、ZnS(Li)シンチレータと大面積受光素子パネルの組み合わせによる第一世代の中性子フラットパネルディテクタ(nFPD)が可能になった。</p>
<p>(5) 中性子フラットパネルディテクタ(nFPD)を用いた白色中性子ラジオグラフィの有用性を示すその足がかりとして、スイッチング素子に酸化半導体を用いた受光素子アレイと LiF/ZnS シンチレータを組み合わせた第一世代中性子フラットパネルディテクタ(nFPD)を開発する。</p>	<p>nFPD の試作機を Ver の変更も含めてを3台組み上げた。本装置は最大厚み 5cm のコンパクトな筐体に収まり、外部電源一つと USB ケーブル1本で駆動可能なユーザビリティの高い装置に仕上がった。J-PARC MLF のビームラインや、小型化中性子源 RANS にても中性子イメージングに成功しており、小型化中性子源でも十分ラジオグラフィが可能であることを実証できた。</p>
<p>(6) 検出器を大面積化し、長辺 30cm 大面積 nFPD を開発する(平成 30 年度末)</p>	<p>検出器の大型化の第一段階として、nFPD の第一世代のコンセプトを引き継ぎ、LiF/ZnS シンチレータを用いて、長辺 30cm 大面積 nFPD を開発した。本検出器を実際に理化学研究所の小型中性子源 RANS に持ち込み、イメージングと 3D CT 撮像実験を行った。その際に得られた中性子デジタルラジオグラフィを図1に示す。また、3D CT の撮像実験も行い、図2に示すように X 線では透過力が不足、内部構造の情報が得られない大型バルブの 3D CT にも成功した。</p>
<p>(7) シンチレータとFPDの組み合わせによる実用検出器の開発(平成 30 年度末)</p>	<p>LiF/ZnS シンチレータと組み合わせた nFPD Ver.1 を試作して、大型中性子源(J-PARC)と小型化中性子源(RANS)にてイメージングのデモンストレーションを積極的に展開した。有感エリアは 31cm</p>

	<p>×26cm まで大面積化することに成功した上、中性子 3 次元CTを実現して、大型の構造物の撮像にも成功した。</p>
--	--

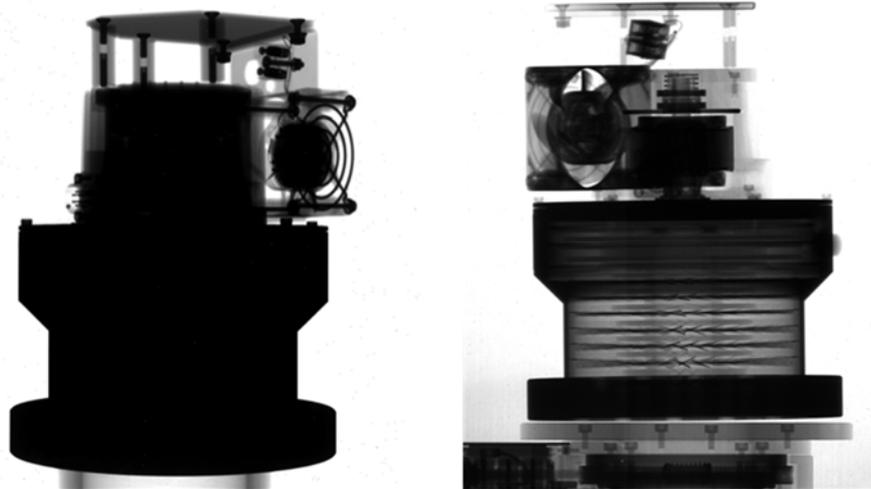


図1. (左)X線 FPD で得られたターボ分子ポンプの X 線ラジオグラフィ。(右)中性子 FPD 得られたターボ分子ポンプの中性子ラジオグラフィ。SUS 製のため、中性子の透過力がよく分かる象徴的なイメージング結果が得られた。

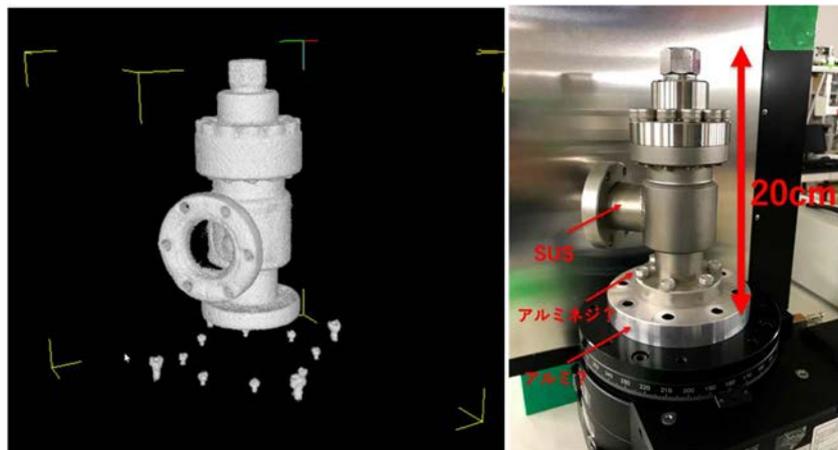


図2. 小型中性子源 RANS での CT 結果。当初の目的であった、小型中性子源の重要な産業利用法の一つである中性子 CT を小型中性子源で達成できた。

### 3. 今後の展開

本研究では、ZnS/LiF との組み合わせで、開発したFPDを積分型の中性子イメージング装置として創り上げてき大きな成果が得られた。今後、より高速なイメージングを考えた場合、検出効率の向上が課題となる。しかし、ZnS/LiF の場合、蛍光体の厚さを厚くしなくてはならず、位置分解能の劣化を招く他、光透過性が低い物性から検出効率もある一定の厚さを超えると低下してしまう。性能を犠牲にせずに高い検出効率をもたせるためには、厚いシンチレータを用いても、シンチレータ内部で光が拡散しないようなシンチレータの構造が必要になる。この

問題に対処するには、X線の場合には、CsI(Tl)の柱状結晶が用いられているが、中性子のシンチレータに対しても、LiNaI<sub>2</sub>:Eu 柱状シンチレータが開発されている。LiNaI<sub>2</sub>:Eu は、CsI の柱状結晶とよく似た構造をもつ中性子用シンチレータであり、中性子の検出効率も向上すると考えられる。これを用いることで、高い解像度と検出効率を両立させてコンパクトに得ることが可能になるため、より一層の高分解能化を図っていくことが考えられる。これによって、中性子画像はぼけたものである、イメージングに時間がかかるというイメージを払拭して、産業界からの応用を開拓していきたいと考えている。

以上