# 研究成果展開事業

研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)

# 産業ニーズ対応タイプ

## 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」

## 完了報告書

研究課題名「中性子フラットパネルディテクタの開発研究」

令和元年5月31日
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

## I.研究計画の概要

### 1. 研究の目標

本研究では、中性子ディ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、中性子ディジタルラジオグラフィを高度化するために高効率・大 面積の中性子フラットパネルディテクタを開発する。本研究で開発を行う領域を図1に示す。



図1. 本研究の開発内容

フラットパネルディテクタは、リアルタイムで読み出し可能なディジタルイメージセンサであり、 従来のラジオグラフィで用いられていた中性子フィルムや中性子イメージングプレートに比べ、 大幅なスループット向上が見込める。フラットパネルディテクタはすでにX線では広く利用され ており、高いスループットが要求される全数検査、3D CT など産業界では今や必須の検出器 となっている。本研究では我々はコンパクト中性子源における中性子の低フラックスという課 題を検出器の①大面積化・②検出効率の向上・③アクティブ受光素子による高感度化という 3つのアプローチをとることで解決し、中性子ディジタルラジオグラフィの基盤技術を確立す る。

- 2. 研究実施予定表 非公開
- 3. 研究費 非公開

## **I.研究成果の創出状況**

#### 4. マイルストーンの達成状況

当初の計画においては図2に示したようにまず、第1ステージでは、10cm口の検出器の開発を 目指し、第2ステージでは、大面積化を図り、第3ステージでは、高感度化と高分解能化を達成す るという構成で、7つのチェックポイントを設定した。



図2. 本研究におけるマイルストーンの設定

一方、研究開始時には、10cm口でよいので、実用になるものを早く製作してほしいという要望を 受けて、開発計画を見直し、受光素子の製作を急ぎ、Li/ZnSシンチレータと組み合わせて、画像 が取得できるものを開発することに注力した。このため、当初の計画を変更して、発光素子の部 分の開発は先送りとして、当面 ZnS/LiF シンチレータを用いることを受光素子であるFPDパネル の開発に資源を集中して進めた。この結果として、10cm口の検出器を用いた小型中性子源と組 み合わせた中性子画像の取得に2年目には成功し、その後、受光素子の大型化を図り、30cm ×25cm のFPDパネルを用いて、RANSで中性子CTの取得にも成功した。このような変遷を経た ために、チェックポイントの中で、検出器の高感度化である CP5 はフォトダイオードの高感度化に より達成し、GEMの高圧化である、CP4、CP6はシンチレータを用いているために不要となり、ス キップしているものの、当初に計画していた目的をほぼ達成することができた。 (1) 高効率ボロンコンバータの設計(CP1)

有感面積 10cm口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27年3月)

### 〇達成状況

有感面積 10cm口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った。簡便なイメージング を実証しており固体のボロンを用いた高効率中性子コンバータの製作を行い、評価した。ま ずコンバータの母材には中性子に対する反応断面積が小さいアルミとシリコンの2種類を用 いた。それら基板に、購入した B10 濃縮 B4C スパッタリングターゲットを用い、イオンスパッタ 装置を用いて B4C の膜付を行った。パラメータを変えて複数のコンバータの製作を行い、中 性子照射時の波高分布の測定を行った。この測定のセットアップを図3に示す。高圧電源に は CAEN DT5533E を用い、中性子とホウ素との核反応で生成される電荷を Glass GEM で増 幅し、96ch の電極が形成されたアルミパターニング基板で読み出す。これらをアルミチャンバ ーの中に封入し、フィードスルーを用いて各電極に電荷積分アンプを接続し、それらの信号を TOF MCA で時間情報(TOF)と共にノートパソコンに記録する。図4に製作したアルミチャンバ ーと、コンバータ、読み出し基板をインストールした評価機の写真を示す。

本装置を用いて、J-PARC にて中性子ビームラインにて主に製作した中性子コンバータ の評価試験を行った。図5には、B4C 膜から得られた波高スペクトルを示す。Ti 保護層を加え た B 膜と比較して波高値が高くでている一方、効率は低めになっている。ビームの入射方向 に対し、コンバータの角度を変え、中性子検出効率のデータを取得した(図6)。原理的には 角度が浅ければ浅いほど高い検出効率が得られるはずだが、角度が浅すぎるとカウントが 逆に減少することが分かった。これは全反射により中性子が弾かれている可能性があり、ダ イヤモンドバイトを用いてマイクロストラクチャ型のコンバータを形成するにあたって重要な知 見が得られた。

 $\mathbf{5}$ 



図3. 検出効率評価実験のセットアップ。中性子ビームに対し、中性子コンバータの入射角度 θを変えて、入射角度に対する応答特性を評価した。



図4. (左)製作した中性子コンバータと Glass GEM、読み出し基板を評価用に組み上げた様子。 (右)アルミチャンバー内に前述のコンバータ類をインストールし、96ch の信号を読み出し用に 配線し、検出器を組み上げた。



図5. J-PARC MLF にて評価機で得られた波高分布スペクトル。B4C 膜を製膜したコンバータの方が、波高値は高くでている反面、検出効率としては、低めに出ている。



図6. 角度依存性の評価。 θ = 5.7° に検出器を固定し、角度を振ってカウントの変化を測定した。 角度が浅すぎるとカウントが逆に減少することが分かり、これは全反射で弾いてる可能性がある。

(2) 大面積ガスシンチレータとカメラを組み合わせた撮像(X線での評価)(CP2)

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)

〇達成状況

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口の電 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。図7には X線を用いた原理評価のために作製した装置の概 要を示す。図8に示すような画像が得られ、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。また電子増幅型ガスシンチレータの発光強度を定量的に評価するた めに単一 X線光子の入射による可視領域の光子数の計測を行い、1MeV あたり 8.5×10<sup>7</sup>光 子の光量まで得られることが分かった。また、図9に示すように、ガス検出器を用いてコンピ ュータ断層撮像についても成功した。



### 図7.X線評価用装置の概要



図8. 電子増幅型ガスシンチレータによる X 線ラジオグラフィのデモンストレーション画像



図9. 電子増幅型ガスシンチレータによる X 線 CT 画像

(3) 10cm口大面積受光素子パネルの設計・製作(CP3)

10cm口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 200μmとし、有感領域を512×512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。図10に製作した密着型受光素子の写真を示す。試作の結果、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(図11)。 一方、量子効率が数%と低いことや一様性の問題があり、良好な画像は得るためには課題が残 る形となった。



図10. 製作した密着型受光素子。有感領域は 10cm口、ピクセルサイズは 200 µm、ピクセル数 512×512。



Gain  $4\,{\times}\,10^{4}$ , 20 kV, 200  $\mu\text{A}$ , 129 sec exposure

図11. 製作した密着型受光素子と電子増幅型ガスシンチレータを組み合わせて撮像した X 線画像。量子効率が低いことや一様性が悪いため、良好な画像は得られなかった。

〇達成状況

有感面積 10cm口の大面積受光素子パネルの設計・試作を行い動作に成功した。一方、

光画像としての読み出しができることを確認したが、量子効率が数%と低く、利用可能な検出 器として用いるには改善が必要であった。

(4) 検出器の高感度化(CP5)

産学共創の場などを通じて、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)が可能になる。そこでこれらを平成28年度に追加予 算をいただき、加速して実施し、10cm角の密着型受光素子を製作し、画像取得を行った。図12に 新たに試作した密着型受光素子の量子効率の評価結果を示す。



図12. 受光素子の量子効率評価結果



図13. 開発した受光素子と各蛍光体と組み合わせて X 線で行った撮像試験の様子(左)と、 得られた X 線ラジオグラフィ画像(右)。

〇達成状況

検出器の高感度化を図り、10cm 角の有感領域で波長 500 nm で 50%以上の量子効率を 実現(図12)し、X 線を用いた試験では図13に示すような高感度かつ高精細な画像取得に 成功した。解像度は 200 μm ピッチのピクセルで、512×512 を実現した。この受光素子と中 性子コンバータと組み合わせて、他機関での評価に提供できる環境を整えることができた。

(5) 有感面積 10cm口の評価用中性子検出器の開発と試験(開発加速による追加項目)

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物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)を開発した(図14左,図14右)。 増幅機構のない固体シンチレータを用いるので中性子検出効率やガンマ線感度などに課題はあ るが、本年度は試用に供するための有感面積 10cm口の評価用中性子検出器を設計し、試作機 を組み上げる。(平成29年10月)

〇達成状況

nFPD の試作機を Ver の変更も含めてを3台組み上げた。本検出器の概念図を図12に 示すと共に、実機の写真を図15に示す。図16に示すように本装置は最大厚み 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。図17に J-PARC MLF のビームラインで取得した中性子ラジオグラフィ の一例を示す。

nFPD Ver.1 は PO のアレンジにより、小型化中性子源 RANS にても試験しており、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(図18)。しかし、強度とし ては J-PARC の 1/22 まで落ちており、より適用範囲を広げるには、強度不足を補うための検 出器の高感度化が求められる。



図14. (左) 一世代 nFPD の概念図。中性子コンバータに市販品の LiF/ZnS を用いた。 (右) 第一世代 nFPD の実機写真。 有感領域は 10cm口である。



図15. nFPD を用いた測定セットアップ。USB 一本で検出器の制御とデータが 取得可能となっている。



図16. 中性子ラジオグラフィの一例(目覚まし時計)。水素が多く含まれる樹脂部分が暗く、 X線とは違い、ベル部の金属部分はよく透過している様子が分かる。



図17. RANS にて撮像した中性子ラジオグラフィの一例。(左)2.5inch HDD、USB ケーブル。(右) HDD、インジケータ

(6)検出器の大面積化(30 cm×30 cm) (CP7)

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 ィジタルラジオグラフィを図18に示す。また、3D CT の撮像実験も行い、図19に示すように X 線で は透過力が足らず、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。



図18. 理化学研究所で撮像したタブレット PC の中性子ラジオグラフィ。この時の露光時間は20 秒であり、小型中性子源でも十分な感度があることと鮮明なラジオグラフィが得られることを証明 できた。





図19. 理化学研究所で撮像した大型バルブの 3D CT。2度ステップで、360度、サンプルを回転 させながら合計180枚の中性子ラジオグラフィから再構成を行った。この時の露光時間は10秒で あり、小型中性子源でも十分な感度があることを証明できた。

(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(CP4、CP6に対応)

前述のように小型中性子源でも鮮明なラジオグラフィや CT 可能であることは示せたが、一方、 さらなる高度化に向けて、検出器の回路部分の再検討を行った。全体のノイズレベルを計測した 結果を図20,21に示す。毎回の計測時にディジタルノイズに起因すると思われる周期的なパタ ーンが乗っていることがわかる。各チャネルは読み出し用の ADC のチャネルに対応しており、FP D側が1ラインずつトランジスタを ON にすることで、ADC の側に導かれる。今回の読み取りでは、 16bit,256 チャネルの ADC チップを5 個用いて、1280 チャネルを読み取っているため、ADC 側の 特性の差が多少表れていることがわかる。ノイズレベルは、フルスケール 1.2pC のレンジで動作さ せた場合、全チャネルの平均で 6.3fC となった。この値は、39300 電子に相当する。

以上の点について、改善を行った結果、ディジタルノイズの混入は抑えられ、ノイズレベルは、 フルスケール 9.6pC で 5 秒間の積算を行った際に、全チャネルの平均で 0.530 ADC unit になり、 0.078fC となった(図22)。この値は、485 電子(rms)に相当する。ノイズレベルがここまで下がると、 中性子による信号が直接計測できるようになることが考えられる。LiF/ZnS の組み合わせの場合、 一個の中性子による発光量は 160000 光子に相当するので、このうち半分の 80000 光子が拾えた として、量子効率を 60%とすると、48000 電子になる。先のセットアップではこれを見るのは事実上 無理であったが、現時点でのシステムとしては、中性子のパルス計測も実行できる可能性がある。 一方、パルス計測の場合には、1 ピクセルあたり 1 中性子を同定しなくてはならず、高速のスキャ ンを行う必要があるが、現在の読み取りは 0.1 秒~数秒間にわたって光信号の蓄積を行うもので あるので、実際にパルス計測を行うためには、これを大幅に短縮して読み出しを可能とするような 高速のデータ取得系がほしい。これができれば、加速器中性子源で有効なエネルギー分析法で ある TOF(Time of Flight)への対応も可能となる。そこで、そのような高速化のためのシステムの設 計に取り組んだ。TOF への対応として、新たに、セルフトリガ方式の読み出しを考案した(特許申 請を予定。詳細は非開示)。また、これまで用いてきた 256channel の ADC は入力チャネルのみ 256 個用意されているが、実際には、4 つのADCを切替えて、データを変換しているので、そこで 速度が犠牲になる。そこで、読み出しが高速になる方式として、入力信号を並列に読み出すことを 考える。本システムのために、32 チャネル×2 の電荷積分増幅器を用いたシステムを設計した。こ れらを1 モジュールとして 40 モジュールを並列に並べて読み出し回路とすることで、1 ラインあたり 10usec で読み出しが可能である。すなわち、TOF で 10usec 近傍の時間分解能が得られることに なる。



図20. 無信号時の出力パターンの変化例



図21. ノイズレベルの例



図22. 改良した結果得られたノイズレベル

### 5. 研究計画全体の進捗状況

当初掲げていた手段(ボロンコンバータと電子増幅型ガスシンチレータを用いた FPD)とは異な るが、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。感度や有 感面積、TOF への対応などの問題はあったが、高分解能の中性子ラジオグラフィの反響は学会・ 産業界からも大きく、これにより中性子ディジタルラジオグラフィの重要性と有用性は理解されつ つあると感じて、継続して大面積化を図り、30cm × 25cm まで達成し、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。また、ノイズレベルについても低減を進め、1000 電子以 下の高い性能を得ることができた。また産学共創の場では TOF 対応が強く望まれていることが分 かったので、新な開発課題としてTOFへの対応についても検討を進め、新しい読み出し方式を考 案し、そのための回路システムについて構築を進めた。今後は、LiF/ZnS シンチレータよりもより 高い位置分解能が実現できる円柱型の LiNal<sub>2</sub>:Eu シンチレータとの組み合わせを進めており、更 なる高分解能化に引き続き取り組んでいく。

#### 6. 研究実施状況

nFPD の開発は東大が総括機関とし、産総研・電機メーカーと密接に連携して開発に取り組ん だ。特に2016年度の加速予算を使用し、フォトダイオードの製造については電機メーカーの液晶 プロセスを利用させていただき、10cm口の有感面積を持つセンサを前倒しで製作することができ た。これは主として産業界からの要望に応えるためであり、まずは中性子のイメージングを実証す ることを念頭に、開発方針を変更して中性子のコンバータに LiF/ZnS を用いた nFPD Ver.1 の開発 を進めた。

さらに逐次研究成果を発信するために、中性子を利用したビーム実験を積極的に行い、KEK、 理化学研究所、J-PARC、京都大学の協力を新たに得て、中性子ビームを用いた試験と開発への フィードバックが可能になった。nFPD の第一世代(LiF/ZnS)は J-PARC と理化学研究所にて評価 しており、現状のスペックでも J-PARC だけでなく、当初から開発目標に掲げている小型中性子源 でラジオグラフィが可能であることが示せた。

しかし検出器の構造としては検出面とサンプルを密着させることができず、その分 L/D の影響 を受けやすくなっており、J-PARC と比較して分解能が劣化する結果となった。言い換えると小型 中性子源では厚いサンプルの撮像や CT では L/D の影響を受けてしまうが、検出器のジオメトリ を改善することで薄いサンプルに限れば J-PARC と同等の分解能(約 200μm)が得られると考え られる。また、引き続き中性子感度(検出効率)の向上は研究開発の課題として残るが、現状の nFPD でも検出器が薄型・軽量であること、検出器本体と、DC 電源、ノートパソコンという非常にコ ンパクトな構成において、高い解像度で中性子イメージングが実現できることが示された。一方、 汎用の検出器としてみた場合には、感度や TOF への対応などの問題を解決する必要がある。 検出感度を高める上では、雑音を下げることが有効であり、これに取り組み、ピクセルあたり、数 百電子まで実現した。さらにシンチレータの発光量を向上させることについては、当初は、GEM (Gas Electron Multiplier)を用いた増幅型のコンバータに置き換えることを計画し、実際にその試験 まで行ったが、画像を取得することを最優先にして研究の加速を行った結果、シンチレーション検 出器の可能性を追求することが、望ましい状況になっている。したがって、高圧ガスを用いて、 GEM-FPD の開発を行うことは適切とはいえないと思い、位置分解能と検出効率をともに高くとる ことのできる新規シンチレータの利用を考えている。近年になって、柱状結晶構造となる LiNal₂:Eu シンチレータが開発されたので、これを利用することで問題を解決しようとしている。また、高速化 については、FPDの信号読み出し方式を変更して、フォトダイオードのアノード側から信号を読み 出すことにより、中性子のヒットしたピクセルのみの信号を読み出すことを可能とし、パッシブ型 (LiF/ZnS)の検出器から、アクティブ型へと大きく進展することが可能となる。これは、パルス型中 性子源との利用では、TOF への対応が可能なことを意味し、ラジオグラフィのノイズとなる高速中 性子やガンマ線の影響を大きく低減することが可能になり、中性子ラジオグラフィの画質が大きく 向上するものと期待できる。

## 7. 産学の対話の活用状況

開発当初から、中性子で何ができるのか、何が見えるのかを産業界に広く知っていただくことが 重要であり、中性子ラジオグラフィのニーズを開拓する場として活用した。特に Ver 1 が完成してか らは、産学の対話の場を用いて共同研究と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。また、サイトビジットと産学共創の場には積極的にデータをオープンにしていき、開発の方向 性に対して、貴重な意見が得られた。 8. 創出された研究成果(企業との共同研究、特許、論文など)のリスト

①企業との共同研究等(共同研究、サンプル・ノウハウの提供など) 非公開

②-1論文·著書(査読付き)

(国内)

- [1] 藤原健, "Glass GEM 検出器", 波紋, vol. 27, No. 1, pp. 12 15, 2017 年 2 月.
- [2] 三津谷 有貴, "感光性ガラス基板を用いた気体放射線イメージング検出器," アイソトープ 協会 『Isotope News 』No.754, 15-17, 2017 年 12 月.

(海外)

- [1] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, T. Fushie, K. Murata, A. Kawamura, A. Koishikawa, H. Toyokawa, and H. Takahashi, "Gas scintillation glass GEM detector for high-resolution X-ray imaging and CT," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 850, pp. 7–11, 2017.
- [2] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, and H. Toyokawa, "Fine-pitch glass GEM for high-resolution X-ray imaging," J. Inst., vol. 11, no. 12, pp. C12050-C12050, Dec. 2016.
- [3] T. Fujiwara, U. Bautista, Y. Mitsuya, H. Takahashi, N. L. Yamada, Y. Otake, A. Taketani, M. Uesaka, and H. Toyokawa, "Microstructured boron foil scintillating G-GEM detector for neutron imaging," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 838, pp. 124–128, Dec. 2016.
- [4] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, T. Yanagida, T. Saito, H. Toyokawa, and H. Takahashi, "High-photon-yield scintillation detector with Ar/CF 4and glass gas electron multiplier," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 55, no. 10, p. 106401, Sep. 2016.
- [5] K. Shimazoe, A. Koyama, H. Takahashi, T. Shindo, H. Miyoshi, J. Inst. 12, C02045 (2017).
- [6] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, H. Takahashi, Radiation imaging with glass gas electron multipliers (G-GEMs), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 878 (2018) 40-49. doi:10.1016/j.nima.2017.09.010.
- [7] Y. Mitsuya, H. Miyoshi, T. Fujiwara, M. Uesaka, H. Takahashi, Gaseous flat-panel detector with glass gas electron multiplier coupled with micro-photodiode array, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section a: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 873 (2017) 56–58. doi:10.1016/j.nima.2017.05.040.
- [8] A. Koyama, H. Miyoshi, K. Shimazoe1,Y. Otaka, M. Nitta, F. Nishikido, T. Yamaya and H. Takahashi, Radiation stability of an InGaZnO thin-film transistor in heavy ion radiotherapy,

Biomed. Phys. Eng. Express 3 (2017) 045009.

- [9] Y. Mitsuya, P. Thuiner, E. Oliveri, F. Resnati, M. van Stenis, T. Fujiwara, et al., Imaging Demonstration of a Glass Gas Electron Multiplier with Electronic Charge Readout, EPJ Web Conf. 174 (2018) 02009. doi:10.1051/epjconf/201817402009.
- [10] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, H. Takahashi, H. Toyokawa, First result of large size Scintillating Glass GEM imager, EPJ Web Conf. 174 (2018) 02003–5. doi:10.1051/epjconf/201817402003.
- [11] H. Takahashi, H. Miyoshi, L. Xuan, Y. Mitsuya, K. Shimazoe, M. Ohno, et al., Development of a transparent single-grid-type MSGC based on LCD technology, EPJ Web Conf. 174 (2018) 02004. doi:10.1051/epjconf/201817402004
- [12] Xuan Lian, Hiroyuki Takahashi, Hiroaki Miyoshi, Yuki Mitsuya & Kenji Shimazoe, Development of a transparent single-grid-type micro-strip gas chamber based on LCD technology, Pages 805-811, 25 Apr 2018

②-2論文・著書(査読無し)

(国内)(海外) 該当なし

③学会発表(招待講演含む)

(国内)

- [1] 高橋浩之、東京大学におけるMPGDの研究開発、第 13 回マイクロパターンガス検出器研 究会、神戸大学先端融合研究環統合研究拠点コンベンションホール、神戸市、平成 28 年 12 月 9 日
- [2] 藤原健、高橋浩之、三好寿顕、山田悟史、若林泰生、池田義雅、大竹淑恵、日野正裕、中 性子フラットパネルディテクタ、日本中性子科学会年会、福岡市、2017/12/3、ロ頭
- [3] 高橋浩之(東京大学), Development of a neutron flat panel detector, Conference on Laser Energy Science /Laser and Accelerator Neutron Sources and Applications 2017, Yokohama, April 21, 2017 口頭
- [4] 藤原健、高橋浩之、三好寿顕、山田悟史、若林泰生、、大竹淑恵、日野正裕、甲斐哲也、篠 原武尚、中性子フラットパネルディテクタ(2)、日本中性子科学会年会、水戸市、2018/12/5、 ロ頭

(海外)

- [1] Yuki Mitsuya, A novel radiation imaging system with scintillating glass gas electron multiplier and flat-panel photodiode array, Imaging-2016 June 13-16, 2016, Stockholm Sweden (口頭)
- [2] Takeshi Fujiwara, Fine-pitch glass GEM for high-resolution X-ray imaging, International Workshop on Radiation Imaging Detectors, July 3-7, 2016, Barcelona, SPAIN (ポスター)
- [3] Takeshi Fujiwara, Scintillating Glass GEM Detector for High Resolution X-ray Imaging, IEEE

Nuclear Science Symposium, October 29- November 6, 2016, Strasbourg, FRANCE (口頭)

- [4] Hiroyuki Takahashi, Development of a Neutron Flat Panel Detector, CRES/LANSA'17, Yokohama, April 21, 2017, (口頭)
- [5] Takeshi Fujiwara, Gas scintillation Glass GEM detector for high-resolution X-ray imaging and CT, MPGD2017, Philadelphia USA, May 8<sup>th</sup>, 2017, (口頭)
- [6] Yuki Mitsuya, Imaging with glass GEM and dynamic time-over-threshold pulse processing method, MPGD2017, Philadelphia USA, May 8<sup>th</sup>, 2017, (口頭)
- [7] Takeshi Fujiwara, High Speed Dose Imaging Detector for hadron-therapy based on Well-type Glass-GEM, IEEE Nuclear Science Symposium, October 22- October28, 2017, Atlanta, USA (口頭)
- [8] Yuki Mitsuya, Takeshi Fujiwara, Hiroaki Miyoshi, Mitsuru Uesaka, Hiroyuki Takahashi, "X-ray imaging with a gaseous flat-panel detector combining a glass gas electron multiplier with a micro-photodiode array," IEEE Nuclear Science Symposium, October 22- October28, 2017, Atlanta, USA (ポスター)
- [9] Hiroyuki Takahashi, Development of a compact flat panel neutron detector, International workshop on position-sensitive neutron detectors (PNSD) 2018, May 17, 2018, Julich, (ポスター)
- [10] Takeshi Fujiwara, Inclined Boron Foil Glass GEM Detector for Neutron Reflectometer, International workshop on position-sensitive neutron detectors (PNSD) 2018, May 17, 2018, Julich, (口頭)
- [11] Takeshi Fujiwara, Demonstration of Soft X-ray 3D Scanning and Modelling with Glass GEM, IEEE Nuclear Science Symposium, November 15, 2018, Sydney, Australia (口頭)
- [12] Yuki Mitsuya, X-ray/Neutron Imaging with glass GEM and dynamic time-over-threshold signal processing, IEEE Nuclear Science Symposium, November 15, 2018, Sydney, Australia (口頭)

④知的財産(特許権、実用新案権など)

- (i)特許出願(国内)(海外)該当なし
- (ii)特許登録 (国内)(海外) 該当なし

⑤他制度への展開 非公開

- ⑥その他(受賞、新聞報道、招待講演、展示会等の出展など)
- [1] 応用物理学会放射線奨励賞 2017年(藤原健)
- [2] イノベーション・ジャパン(展示会)、「ディジタル中性子カメラ&中性子スキャナー」、 2018.8.30-31

9. その他特記事項

今回の開発においては、新規半導体を用いたフラットパネル検出器を製作する点が最も重要で あったが、それを請負う電機メーカーがプロジェクト開始直後に経営主体が大きく変わるという状 況の変化があった。このため、研究開発の戦略が当初の予定通りに進められるかどうか不安もあ ったが、ここまではなんとか開発を進めることができ、高性能の検出器の基本形が構築できるとこ ろまではきた。しかし、成熟した製品としてはもう少し改良が必要な現段階において手を放してしま うと、センサよりもディスプレイの側に注力している企業の方向性と合わずに、本技術が日の目を 見ずにつぶれてしまう可能性が高い。電機メーカーとしては、外部資金で製造コストが賄えるなら ば、本フラットパネル検出器の改良、特に今回新たに東京大学で考案したパルス信号の計測が 可能な高速読み出し法やTOF対応などの機能の追加は可能であるということであるので、今後の 状況を考えると、もう少しJSTからの支援を継続して受けて、製品化へつなぐところまで、お願いし たい。そうすれば、中性子の検出器に限らず、X線やガンマ線など広い分野で大面積かつ安価な 計測器が利用可能になり、将来的に大きな価値を生み出すことができると考える。

## Ⅲ. 今後の展開

10. 成果の今後の展開

これまで、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たが、この場合、検出効率を高くとろうとすると、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。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(TI)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、最近、開発された柱状結晶のシンチレータの適用を新たに 検討している。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、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。