

博士論文

ガスシンチレーション方式

高空間分解能中性子イメージング装置の開発と

新市場開拓

2020年 3月

光産業創成大学院大学

近藤 治靖

要旨

ガスシンチレーション方式

高空間分解能中性子イメージング装置の開発と 新市場開拓

本研究では、高空間分解能を特長としたガスシンチレーション方式中性子イメージングシステムの開発を行った。更に、開発品を用いた市場開拓の初期実践について報告する。

中性子線は放射線の一種であり、X線と同様に透過性が高いが、X線が重元素の可視化に用いられるのに対し軽元素の検出に用いられるという特徴がある。これらを活かして、二次電池や鉄鋼材の不良分析、インフラストラクチャーの非破壊検査など中性子イメージングの活用の拡大が期待されている。本研究では、既存の中性子二次元検出器の空間分解能を上回る、キャピラリープレート(CP)を用いた中性子ガス電子増幅検出器の開発を行うことを目的とする。一方、メーカーが産業基盤の整っていない未成熟市場に新しい製品を市場に投入する時、メーカーとユーザー間で共通の評価基準が定まらず、メーカーが当初から適切な仕様の製品を市場に投入することは困難である。このような状況にある中性子検出器市場に対し、市場開拓の初期戦略を実践し開発品の市場投入を試みる。

中性子を検出するために、一般的にはまず、中性子変換材料(コンバーター)との核反応により中性子を荷電粒子に変換する。コンバーターとしては、非破壊検査に用いられる熱中性子との反応断面積が大きい ^{10}B などが用いられる。荷電粒子はコンバーターから全球方向に放出される。その拡がりを狭い範囲内に制限することにより高空間分解能で検出できるようになる。細いガラス管を高密度に並べたCPを用いると荷電粒子の拡がりを狭い範囲に制限できる。さらにCPの穴を適当な気体で満たすことによりガス電子増幅作用とシンチレーション作用をもった位置敏感型比例ガス計数管検出器となる。すなわち、このキャピラリープレートガス電子増幅型検出器(Capillary Plate Gas Detector: CPGD)は変換と増幅の作用により中性子の二次元分布を光学像に変換する機能を有する。さらに、この検出器は γ 線に低感度であり、材料に中性子耐性もあることから中性子検出器として適している。

コンバーターとCPGDを組み合わせた中性子検出用CPGD(n-CPGD)を実際に構築した。

コンバーターは熱中性子に対し感度が最大となるよう ^{10}B を $3\ \mu\text{m}$ の厚さでn-CPGD入射窓に成膜した。CPは穴径と穴間隔をそれぞれ $50\ \mu\text{m}$ 、 $58\ \mu\text{m}$ とした。このn-CPGD、イメージインテンシファイアー、s-CMOSカメラで構成したガスシンチレーション方式中性子イメージング装置(n-GSI)を構築した。開発したn-GSIを京都大学小型加速器型中性子線源で評価し中性子像の取得に成功した。検出効率は約4%であった。しかし、一つの中性子入射に対してCPの複数の穴が同時に発光し、中性子の入射位置を精度良く判別できなかった。

そこで、一つの中性子入射に対して一つの穴しか光らないよう改良を行った。複数の穴が発光する原因は、コンバーターとCPの間のわずかなギャップを荷電粒子が水平方向に飛ぶことにあり、このギャップを $30\ \mu\text{m}$ 以下にする必要があると判明した。そこで、成膜したコンバーターを、CP(穴径 $50\ \mu\text{m}$ 、穴間隔 $64\ \mu\text{m}$)に直接マウントする構造により、ギャップを $20\ \mu\text{m}$ 以下とすることを可能にした。この改良型n-CPGDを搭載したn-GSIを京都大学研究炉中性子線源で評価し、一つの中性子入射に対しその位置に対応するCPの一つの穴だけが発光することを確認した。エッジ法により計算したModulation Transfer Function (MTF)により空間分解能を評価し、 $76\ \mu\text{m}$ の空間分解能が得られることを確認した。実用に向けた画像取得の試みとして、ボルトとナットの噛み合わせ部の明瞭な中性子透過像の取得に成功した。

開発した検出器の市場投入を目指し、市場開拓の初期戦略を実践した。中性子検出器の世界市場は、2018年には423 M\$が2023年には1107 M\$へと成長が見込まれている。一方で、3C分析により、導入期を脱していないことがわかった。そこで、競争戦略論とマーケティング論に基づく導入期に実践すべき項目をまとめ、実践した。導入期ではメーカーとユーザーの共通の評価基準が確立されていない時期であり、それを確立することが急務である。そのためには、メーカーとユーザーは試行錯誤ができる環境を作ることが重要である。したがって、メーカーとしては独自価値のある製品を市場に投げかけるとともに、イノベーターへアクセスし、フィードバックループを確立する必要がある。この指針に基づき開発した製品を市場に提示する活動を行ったところ、複数の第一顧客候補にアクセスすることに成功した。そして、評価機の試用に向けた相談を進めており、試行錯誤環境構築の緒に就くことに成功した。メーカーとユーザーの相互協力により共通の評価基準を確立し、市場の形成を目指すとともに、今後成長期に向かうための方策の検討を行った。

Abstract

Development of gas-scintillation type high spatial resolution neutron imaging system and its market cultivation

This thesis describes the development of a gas-scintillation type high spatial resolution neutron imaging system and the initial practice of market cultivation of the developed product.

Neutron beams are a type of radiation, which have high transparency like X-rays and can discriminate light elements; in contrast, X-rays can visualize heavy elements. Due to these advantages, neutron beams are expected to be used in several applications such as failure analysis of secondary batteries and steel materials and nondestructive inspection of infrastructures. The purpose of this study is to develop a gas electron amplifier for neutron detection using a capillary plate, which has higher spatial resolution than existing two-dimensional neutron detectors. However, when a manufacturer introduces a new product to an immature market without an established industrial environment, it is difficult for manufacturers to bring products with appropriate specifications to the market. This is because a common evaluation criterion has not been established between manufacturers and users. Hence, for the neutron detector market, the author has introduced an initial strategy of market cultivation for the developed product.

To detect neutrons, they are first converted into charged particles by a nuclear reaction with a neutron conversion material (converter). ^{10}B , which has a large reaction cross-section for thermal neutrons, is often used as a neutron converter. The developed charged particles diverge from the converter for a full solid angle. Hence, it is necessary to localize charged particles into a narrow area to achieve high spatial resolution. A capillary plate (CP), where thin glass tubes are arranged at high density, is adopted for realizing charged particle limitation. Furthermore, by filling in an appropriate gas into the glass tube of the CP, it becomes a position-sensitive type proportional counter through gas electron multiplication and gas scintillation. As a result, the developed Capillary Plate Gas Detector (CPGD) works as a device that converts a two-dimensional neutron distribution into an amplified optical image. Furthermore, this detector has low sensitivity to γ -rays and is resistant to neutrons.

A neutron CPGD (n-CPGD) was constructed with a neutron converter and a CPGD. A ^{10}B layer was formed as the neutron converter by depositing on the entrance window of the n-CPGD. The thickness was 3 μm to maximize the sensitivity to thermal neutrons. The diameter and the pitch of the capillaries of the CP were 50 μm and 58 μm , respectively. Hence, a gas-scintillation type neutron imaging system (n-GSI) was constructed, which includes the n-CPGD, an image intensifier, and an s-CMOS camera. The developed n-GSI was evaluated using the neutron source with the small size accelerator at Kyoto University. The neutron images were successfully acquired and the detection efficiency was calculated to be about 5%. However, multiple CP holes emitted light simultaneously for one incident neutron; as a consequence, it was difficult to accurately determine the position of the incident neutron.

Next, a second prototype was constructed to improve the spatial resolution. The reason why

multiple capillaries emit light for a single incident neutron was that the charged particles flew horizontally in a slight gap. The gap was induced by the insufficient flatness of both the converter and the CP surface. It was found through trajectory simulation that this gap must be 30 μm or less. An improved manufacturing process of the converter enabled the gap to be reduced to 20 μm or less. The evaluation of n-GSI equipped with this improved n-CPGD was conducted using the Kyoto University research reactor. It was confirmed that only one CP hole corresponding to the position of an incident neutron emitted light. Using the improved detector, some practical neutron images can be successfully acquired. The spatial resolution was found to be 76 μm , which was derived from the edge method based on the modulation transfer function (MTF).

Finally, the initial practice of market cultivation was tested using the developed detector. The global market for neutron detectors is forecasted to grow from \$423M in 2018 to \$1,107M in 2023. However, it is still in the introductory stage of the product life cycle model according to 3C (Customer, Competitor, Company) analysis. Therefore, tactics in the introductory stage based on the theory of competitive strategy and the theory of marketing were performed. In the introductory stage, a common evaluation criterion has not been established between manufacturers and users, which is needed. Hence, manufacturers must follow the following practices. First, develop and supply new products with unique value. Second, establish a connection with innovators trying the product. Finally, establish a feedback communication with the innovators. This produces a trial-and-error environment where manufacturers and users can work together. Moreover, it is important to establish a common evaluation criterion. The tactics in the introductory stage were carried out regarding the developed detector. Then, connections with several first customer candidates trying out the demonstration machine were successfully established. Therefore, it can be said that the construction of the trial-and-error environment is successful. It is also a way to move the market to the growth stage of the product life cycle model.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 中性子線の産業利用動向と中性子検出器市場と国内中性子線源	1
1.1.1 産業利用の動向	1
1.1.2 中性子検出器の市場と分野別ニーズ	2
1.1.3 国内の中性子線源	3
1.2 中性子線の産業利用における課題	6
1.2.1 中性子線源利用の実際的な障壁	6
1.2.2 中性子検出器に求められる機能・性能	7
1.2.3 課題のまとめ	8
1.3 主要な中性子二次元検出器	8
1.4 既存検出器のまとめと高度化のための障壁	14
1.5 二次元検出器の開発の方向性	15
1.6 本研究の目的	17
1.7 本論文の構成	17
第 2 章 中性子コンバーターとキャピラリープレートガス電子増幅型検出器	19
2.1 中性子イメージングに適した中性子コンバーター	19
2.1.1 中性子イメージングに利用される熱中性子	19
2.1.2 熱中性子検出用中性子コンバーター	20
2.2 キャピラリープレートを用いたガス電子増幅型検出器	22
2.2.1 キャピラリープレート (CP)	23
2.2.2 キャピラリープレートガス電子増幅型検出器	24
2.2.3 CPGD の空間分解能	29
2.3 第2章まとめ	31
第 3 章 ガスシンチレーション方式高空間分解能中性子イメージング装置の開発	32
3.1 中性子検出用のキャピラリープレートガス電子増幅型検出器の原理	32
3.1.1 中性子コンバーターの変換効率と膜厚最適化	32

3.1.2	ガス中に放出された荷電粒子の拡がり	33
3.1.3	荷電粒子を止めるキャピラリープレートの壁の厚さ	34
3.1.4	キャピラリープレートガス電子増幅型検出器の仕様	34
3.2	ガスシンチレーション方式中性子イメージング装置の開発	35
3.2.1	中性子ガス電子増幅型検出器	35
3.2.2	中性子イメージング装置	36
3.2.3	検出器の中性子照射実験	38
3.2.4	中性子照射実験結果と考察	38
3.3	検出器の高空間分解能化	42
3.3.1	シミュレーションを利用した空間分解能向上の検討	42
3.3.2	検出器の改良	44
3.3.3	改良型検出器の中性子照射実験	48
3.3.4	改良型検出器の実験結果と考察	50
3.4	空間分解能のさらなる向上のための方策	61
3.5	第3章まとめ	62
第4章	新市場開拓の実践	63
4.1	中性子線産業利用における中性子検出器市場の特徴	63
4.1.1	Customer(市場・顧客)	63
4.1.2	Competitor(競合)	64
4.1.3	Company(著者の所属企業H社)の技術開発	64
4.1.4	中性子検出器市場の特徴まとめ	65
4.2	中性子二次元検出器市場の開拓	65
4.2.1	導入期の市場開拓に関する理論	65
4.2.2	中性子二次元検出器の市場開拓を目指した実践項目	67
4.3	実践項目の遂行	69
4.3.1	実践1 独自価値のある製品の開発	69
4.3.2	実践2 イノベーターへのアクセスの実践	69
4.3.3	実践3-1 フィードバック	73
4.3.4	実践3-2 製品価値の見直し	74
4.4	今後の方針	74

4.5 第4章まとめ.....	76
第 5 章 結論.....	77
参考文献.....	80
謝辞.....	84
付録.....	86
業績目録.....	94

第 1 章 序論

産業分野において、品質の良いものを早く安く作るために、製品の不良分析などを行う非破壊検査の需要が高まっている。X線ラジオグラフィによる非破壊検査は半導体検査などで利用されているが、金属内部のオイルや水素などの軽元素分布を可視化することはできない。それを可能とする手法に中性子線ラジオグラフィがあるがその利用は拡大していない。中性子線の産業利用を促進させることができれば、製品の品質や安全性の向上につながる。中性子線非破壊検査のアプリケーションを増やすために中性子二次元検出器の高度化の研究が行われている。非破壊検査の対象には複雑な内部構造を有するものも多くあるため、より細やかな対象が見えるようになれば中性子線利用のアプリケーションの拡大につながると考えられる。本章では、中性子線利用の現状と課題、中性子検出器の課題について述べ、本研究の目的、論文の構成を示す。

1.1 中性子線の産業利用動向と中性子検出器市場と国内中性子線源

1.1.1 産業利用の動向

産業用途向けの非破壊検査において、中性子線ラジオグラフィの需要が高まってきている。中性子線は、X線、 α 線、 β 線、 γ 線といった放射線の一種であり、X線と同じように物質を透過する能力に優れている。X線と比較した中性子線の特徴は、それを用いることで軽元素を含む物質の内部構造の検査に適していることや、透過能力が高いため比較的厚い金属でも内部を可視化できることが挙げられる。そのため、航空・宇宙、自動車、防衛産業にて航空機エンジン用タービンブレード、エアバック用火工品、起爆管などの検査などで利用されてきた[1,2]。近年、新しいエネルギー分析イメージングの手法が開発され[3]、Liイオン電池や燃料電池の内部検査、劣化対策が急務な橋脚などインフラストラクチャーのコンクリート内鋼材の腐食検査などに中性子線の応用研究が進められている。このように、中性子線は非破壊検査による不良材料の早期発見、不良原因の特定、新規材料の開発、安全管理などで利用が拡大しつつある。

この他にも、中性子線の散乱・回折パターンの解析により、結晶構造の解析、金属部材の残留応力の測定、バルク材料中のナノ析出物の同定などへの利用が行われている。計測以外にも、半導体分野における核変換を利用したシリコンドーピングや、放射性同位体(RI)

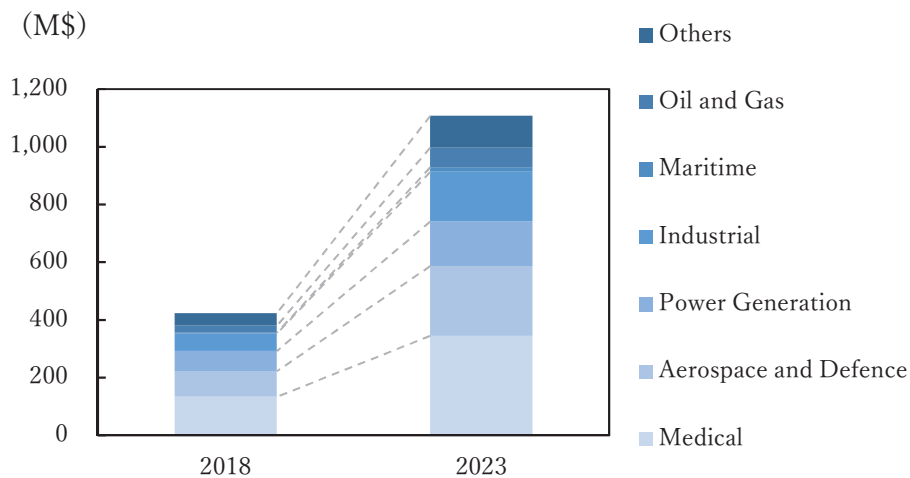


図1.1 世界の中性子検出器市場推移[2]

の製造など核反応による対象物の改質といった利用がある。さらに、ホウ素中性子捕捉療法(boron neutron capture therapy: BNCT)と呼ばれるがん治療にも利用され、2016年から一部の病院で治験が開始されている[4,5]。

1.1.2 中性子検出器の市場と分野別ニーズ

調査会社によるレポート[2]によると、中性子検出器は、医療、航空宇宙・防衛、発電、工業、海事、石油・ガスなど様々な分野で、線量モニター、安全監視、検査などに採用されている。その世界市場は、2018年には423 M\$であるが、2023年には1107 M\$になると予測されている(図1.1)。市場シェア全体の主要な分野は医療と航空宇宙・防衛であり、シェアはそれぞれ約30%、約20%と全体の半分を占めている。工業分野では、高い成長が見込まれており、2018年は60 M\$であるが2023年には170 M\$となっている。

医療分野では、がん治療に利用する中性子線の発生率の管理や、医療従事者・患者などの放射線被曝の管理に使用されており、がん症例の世界的な増加が、中性子検出器市場の主要な拡大要因となっている。航空宇宙・防衛分野では、エンジンなどの不良の発見や、国境・空港などで爆発物、有害な放射性物質の識別のために使用されており、国民の安全に脅威をもたらすテロ活動の増加が中性子検出器市場拡大の要因となっている。発電分野では、原子炉運転、核廃棄物輸送、原子炉廃炉などの放射線漏れの監視、作業員の被曝管理に使用されており、原子炉の廃炉などが検出器市場の成長の要因となっている。工業分野では、

Li イオン電池や鉄鋼材など製品の品質を高めるための非破壊検査に利用されており、CO₂削減のための自動車の低燃費化に伴う製品開発が中性子検出器市場成長の要因となっている。海事分野では、テロ攻撃に使用できる核兵器や核物質の検出に使用され、ポートや船に搭載される。テロ攻撃の脅威が中性子検出器市場の成長要因となっている。石油・ガス分野では、石油・ガスの探索に使用されており、石油・シェールガス探査活動の拡大が中性子検出器市場の成長要因となっている。その他の分野は、大学や研究機関などの核物理学の研究で使用されており、エネルギー源、先端材料、医療工学などの研究活動に対する政府の補助金や民間の投資が中性子検出器の市場成長の要因となっている。

航空宇宙・防衛、工業、その他の分野で特に成長が見込まれている中性子線利用方法の一つに中性子線ラジオグラフィがある。これには中性子線の位置と線量を記録する中性子二次元検出器が必要である。

1.1.3 国内の中性子線源

中性子線ラジオグラフィには中性子線源と中性子二次元検出器が必要である。従来、中性子線利用の研究は主に原子炉で行われてきた。国産としては初めての研究炉である日本原子力研究開発機構研究炉(JRR-3)は、昭和37年に臨界に達し、その後性能向上の改造を経て、平成2年からは出力20 MW の高性能汎用研究炉として利用され中性子線ラジオグラフィや回折・散乱などの研究が進められた。原子炉に加え、2008年には大型陽子加速器施設である大強度陽子加速器物質・生命科学実験施設(J-PARC/MLF)の運用が開始された。図1.2は、現在、国内で中性子線ラジオグラフィが行える原子炉、加速器型の中性子線源施設を示し、その数は8施設と限られている[6]。

中性子線ラジオグラフィでは、線源の強度が低いと目的の画像を得るために時間を要する。そのため、中性子線源の強度は重要である。図1.3に中性子の利用用途とそれぞれに必要な中性子発生強度をまとめた[7]。線源が1秒間に発生できる中性子個数を中性子発生強度と呼び、単位は n/s である。ここで n は中性子1個を表す。ラジオグラフィやエネルギー分析イメージングを行うには、 10^{11} n/s 以上の発生強度をもつ中性子線源が必要である。同様に、回折・散乱実験、非弾性散乱・BNCT では、それぞれ、 10^{12} n/s、 10^{13} n/s

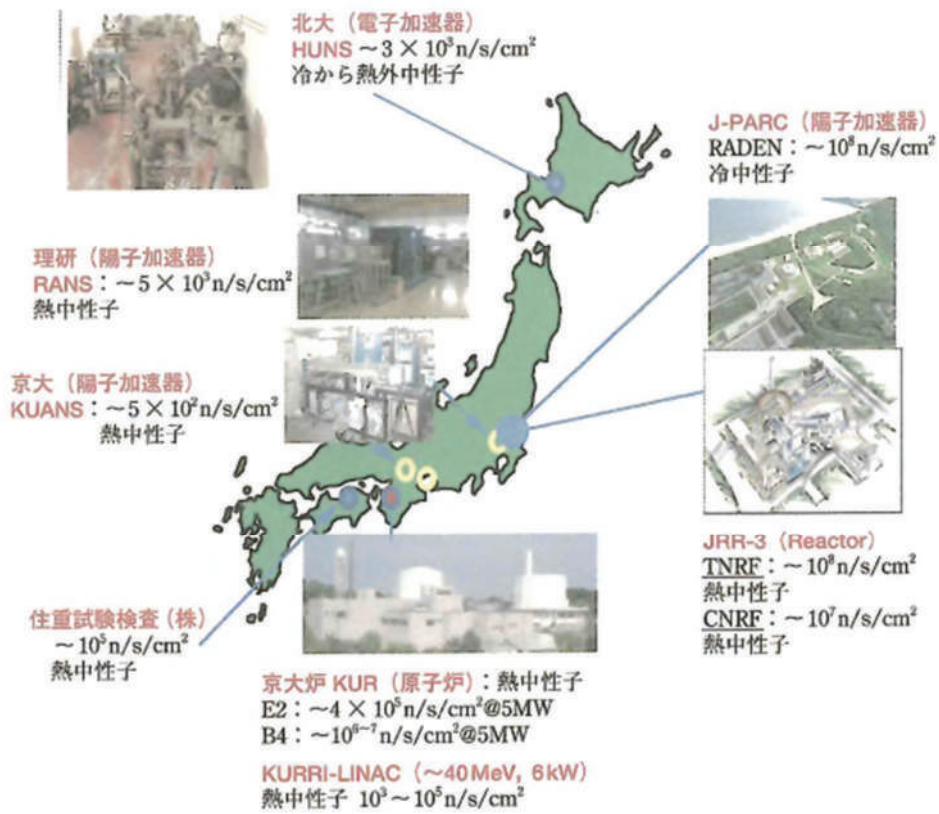


図1.2 国内の中性子イメージング施設と中性子フラックス[6]

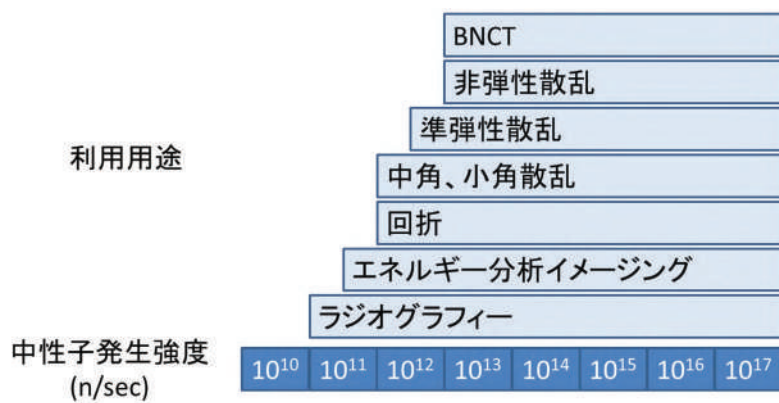


図1.3 中性子利用用途とそれぞれに必要な中性子発生強度[7]

表1.1 国内中性子線源の中性子発生強度と
試料位置中性子線強度

中性子線源 (ビームライン)	中性子発生強度 (n/s) [7-11]	試料位置中性子線強度 (n/cm ² /s) [6]
J-PARC (RADEN)	10 ¹⁷	10 ⁸
JRR-3 TNRF	10 ¹⁷	10 ⁸
KUR(E2、B4)	10 ¹⁶	10 ⁵⁻⁷
KURRI-LINAC	10 ¹²	10 ⁴
HUNS	10 ¹²	10 ³
RANS	10 ¹²	10 ³
KUANS	10 ¹¹	10 ²
SHI-ATEX	10 ¹²	10 ⁵
核融合	10 ⁸⁻¹⁰	10 ²
²⁴¹ Am-Be	10 ³	-
²⁵² Cf	10 ⁶	-
レーザー駆動型	10 ⁵	-

以上の発生強度が必要とされている。国内の主な中性子源の発生強度を表1.1に示す。J-PARCの発生強度は10¹⁷ n/sで、実際の実験を行う場合の試料位置での強度は約10⁸ n/cm²/sである。原子炉である京都大学複合原子力科学研究所の研究炉(KUR)、JRR-3の発生強度は10¹⁶ n/s~10¹⁷ n/sであり、試料位置での強度は10⁵ n/cm²/s~10⁸ n/cm²/sである。北海道大学電子加速器型中性子源(HUNS)、理化学研究所陽子加速器型中性子源(RANS)、京都大学複合原子力科学研究所電子加速器型中性子源(KUR-LINAC)、住重アテックス株式会社陽子加速器型中性子源(SHI-ATEX)の発生強度は10¹² n/sであり、試料位置での強度は10³ n/cm²/s~10⁵ n/cm²/sである。京都大学理学部陽子加速器型中性子源(KUANS)の発生強度は10¹¹ n/sで試料位置での強度は10² n/cm²/sである。核融合反応を利用した核融合中性子源は、発生強度は10⁸ n/s~10¹⁰ n/s[8]で試料位置での強度は10² n/cm²/sある。可搬な中性子線源として用いられる放射性同位体線源には、²⁵²Cf、²⁴¹Am-Beがあり、その発生強度はそれぞれ10⁶ n/s、10³ n/sである[9]。レーザー駆動型中性子源は、加速器型中性子源に比べると、パルス幅が短いかつソースサイズが小さいため、ピークフラックスが極めて高くなることが特徴である。発生強度は10⁵ n/sである[10,11]。

現状、中性子線ラジオグラフィーに必要な10¹¹ n/s以上の発生強度を実現可能な中性子線

源は前述の8箇所のみである。放射性同位体線源のような可搬の中性子線源で中性子ラジオグラフィーが実現可能であれば利用機会は格段に増加すると考えられるが、これらでは発生強度が5桁以上不足している。

1.2 中性子線の産業利用における課題

中性子線利用は、利用機会が少ないなど産業分野のユーザーにとって利用しにくい状況である。したがって、中性子線利用を検討しているユーザーは中性子線でどのような計測が可能なのか判断できない。一方、メーカー側も具体的にどのような機能・性能を持った製品を投入したらよいか定めることができない。つまり、メーカーとユーザーがお互いに共通の評価基準を確立できていない状況にある。

1.2.1 中性子線源利用の実際的な障壁

中性子線源の実際的な利用方法においても困難が存在する。ユーザーが中性子線ラジオグラフィーを行う方法の一つは、J-PARCやJRR-3の研究課題として申請を行い、それに採択される必要がある。平成29年度J-PARC産業利用報告会の報告によると、J-PARCにおける2008年から2016年の産業分野の課題採択率は29.7%であった[12]。つまり、利用を希望したユーザーの7割が利用できていないことになる。さらに、申請のタイミングは年2回であり、そのタイミングを逃すと次回申請まで待つ必要がある。例えば、ユーザーが製品の不良解析のために中性子線ラジオグラフィーを必要としたのが、利用申請締め切りの直後であった場合、申請は半年後となってしまふ。製品の不良解析は早期に行わなければならないが、解析できる時期がわからない。また、対象物が大きい場合は施設に持ち運べないため検査することができない。J-PARCを利用する際のビーム料金は、論文などで成果を公開する場合は免除となるが、成果を公開しない場合は約300万円/日である。企業ユーザーが成果を公開できないような製品の不良分析を行うには、費用対効果の判断が重要となる。JRR-3は、2011年の東日本大震災以降、国の規制により停止しているため現在は利用できない。また、国内に複数箇所ある大学所有の小型加速器型中性子源は研究用途であり、製品の不良解析など企業ユーザーの単独実験用途では利用できない。一方で、企業ユーザーが利用可能な小型中性子線源にRANS[13]があり、RANSではコンクリート内部の鋼材の腐食や水分の可視化に成功してきた。近年では、中性子線イメージングだけでなく回折実験などのトライアルユーザーが増え、2019年度は数ヶ月先までビームタイムの利用予定が埋まり、

利用するのに申込みから実施まで期間を要している。これらのことから、大型施設だけでなく、小型施設も産業分野のユーザーが使いたい時に使えるような環境となっていない。つまり、中性子線源はユーザーにとって使いにくいいため、中性子線利用の産業基盤は整っていない状況にある。

このような状況を改善すべく、産業利用を目的とした小型加速器型中性子源の開発を理化学研究所が進めている[14]。また、国家プロジェクトでは、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のプログラム産業ニーズ対応タイプで「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」を進めている[15]。しかし、産業利用のための中性子線源など基盤技術はまだ開発段階あり、規格などは定まっていない。そのため、ユーザーは、中性子線の利用を検討したくても、どこの中性子源が使えるのか、いつ使えるのか、どのような計測を行うことができるのかなどわからないでいる。

1.2.2 中性子検出器に求められる機能・性能

ユーザーのニーズに次のようなものがあり、中性子線の利用が期待されている[12,16,17]。橋梁表面から数十 cm 内部にある鋼材腐食検査、コンクリートの数十 μm の亀裂に含まれる水分検査、鉄鋼板内の数 μm 大の不純物検査、半導体部品に利用される樹脂材内部数十 μm の空隙有無検査、エアコン熱交換器内のサブ mm の触媒動き、Li イオン電池内のサブ mm の Li イオン分布、燃料電池電極材である水素貯蔵合金水素貯蔵量、非金属材料の接着強度判定、鉄鋼溶接内部の応力測定などがある。これらには、高い空間分解能が必要とされる。また、エネルギー分析イメージングは、中性子線エネルギーに依存した中性子透過率の変化を場所ごとに解析することで観察対象の内部形状だけでなく、結晶構造や元素、磁場などの空間的な分布を定量的に可視化することが可能である。エネルギー分析イメージングでは中性子線が検出器に到達した時間(飛行時間)と線量を計測する TOF(Time of Flight)計測のために高い時間分解能が必要とされる。また、物質の内部の動的変化を観察したい時にはビデオ計測できる機能などが必要となる。このほかにも、中性子線照射環境下では γ 線などの放射線が発生するため、中性子線との区別が必要であり、 γ 線に対して低感度であることが要求される。検出器に到達する中性子が少ないため、効率よく検出できることが必要である。中性子線のビームのサイズが大きいためそのサイズに合った有効面積が必要である。

上述のように、中性子線の二次元検出器の重要な機能には、空間分解能、時間分解能、

γ 線に対する感度、検出効率、有効面積などがある。

1.2.3 課題のまとめ

中性子線源は、利用機会が少ないなど産業分野のユーザーにとって利用しにくい状況にある。利用機会を増やすためコンパクト中性子線源などのシーズ開発が進められている段階であり、計測技術の規格も定まっていない。つまり、中性子線利用を検討しているユーザーは中性子線でどのような計測が可能なのか判断できないため、メーカー側に具体的な機能・性能を提示できないでいる。一方、計測に使用する中性子二次元検出器のメーカー側も具体的にどのような機能・性能を持った製品を投入したらよいか定めることができない。つまり、メーカーとユーザーの共通の評価基準が確立できていないことが課題である。

このような産業基盤が整っていない未成熟な市場にメーカーが新しい製品を投入する時、メーカーは製品の差別化を図り、製品の認知度を高めることが重要である。それを足掛りにメーカーとユーザーが試行錯誤できる環境を作り、メーカーとユーザーの間で共通の評価基準を確立していくことが重要である。次節では、製品の差別化を図るため、既存の中性子二次元検出器について述べる。

1.3 主要な中性子二次元検出器

ここでは、現在利用または研究が進められている主要な中性子二次元検出器を紹介する。それらには ZnS/⁶Li+カメラ(CCD、CMOS など)、中性子イメージインテンシファイアー(image intensifier: I.I.)、nGEM(neutron gas electron multiplier)、G-GEM(glass GEM)、 μ NID(micro-pixel chamber based neutron imaging detector)、⁶Li ガラスピクセル検出器、⁶Li ガラスシンチレーター+位置敏感型光電子増倍管、MCP(micro channel plate)検出器、工業 X 線用フィルム+Gd コンバーター、中性子用イメージングプレート(imaging plate: IP)などがある。これらの検出器の特徴を以下に示す。

ZnS/⁶Li+カメラ

この検出器は ZnS/⁶Li シンチレーターで発生したシンチレーター光をカメラで撮像する(図1.4)[18]。シンチレーターは、放射線(中性子線)が入射するとシンチレーション光を放出する。表1.2に代表的な中性子検出用のシンチレーターとその特性を示す[19]。ZnS/⁶Li は、他のシンチレーターに比べ発光量が約160,000 photon/neutron と大きく、発光波長は450 nm で可視光用カメラの受光素子に感度がある波長である。また、ZnS は不透明なためシンチ

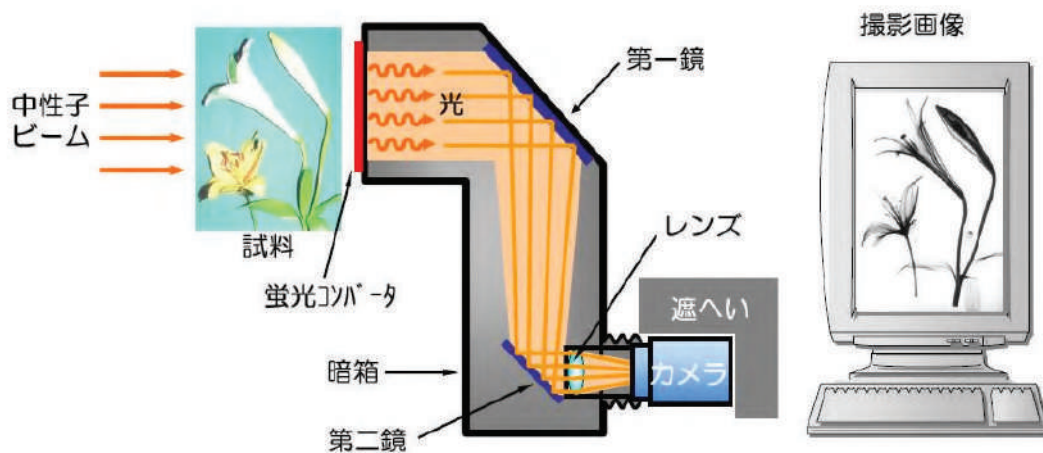


図1.4 ZnS/⁶Li+カメラの概略図[18]

表1.2 代表的な中性子検出用のシンチレーターとその特性[19]

シンチレーター	発光量 (photons/neutron)	密度 (g/cm ³)	Li含有量 (atoms/cm ³)	発光波長 (nm)	発光減衰時間 (ns)	α / β 比	透明性	湖解性	波形弁別
Li glass	6,000	2.5	$\sim 1.6 \times 10^{22}$	395	75	0.23	Yes	No	-
LiI	49,500	4.06	1.8×10^{22}	470	1,400	0.9	Yes	Yes	-
LiF/ZnS	$\sim 160,000$	2.6/4.0	$\sim 2.0 \times 10^{22}$	450	2,000	-	Opaque	No	-
LiCaAlF ₆ (Ce)	5,000	2.99	9.6×10^{21}	285	40	0.4	Yes	No	可
LiCaAlF ₆ (Eu)	40,000	2.99	9.6×10^{21}	375	1,600	0.2	Yes	No	不可
Cs ₂ LiYCl ₆ (Ce)	64,000	3.31	3.5×10^{21}	370	1/50/1,000	0.67	Yes	Yes	可

レーター内での光拡散は大きく、シンチレーターの表面をカメラで撮像することで中性子線の透過像が得られる。このタイプの検出器では、一般的な空間分解能は100 μm である。より空間分解能を高める研究が進められており空間分解能50 μm が得られている[20]。しかし、そのためには膜厚を薄くする必要があり、それに伴い検出効率が数%に下がるという問題がある。このシンチレーターは大面積(300 mm \times 300 mm)の作製も容易であり、検出器の構成も単純であることから J-PARC、JRR-3、RANS など多くの施設でこの構成の検出器が利用されている。この検出器の問題点には以下がある。空間分解能を高めると検出効率が下がる(50 μm が限界)。シンチレーターの発光の減衰時間が2 μs と長く時間分解能を必要とする TOF 計測に対応できない。シンチレーターは材料に原子番号の大きい成分を高密度で含むため γ 線に感度をもつ。その結果、中性子と γ 線の弁別能が後述するガス電子増幅型検出器に比べて低い。また、中性子線は Si ウエハーのドーピング成分に影響を及ぼ

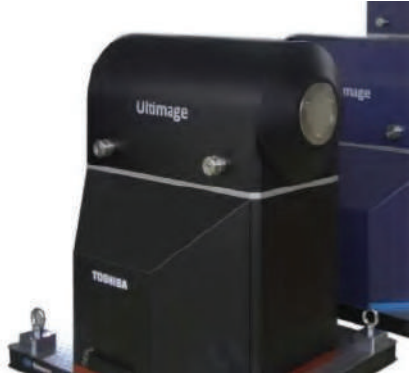


図1.5 中性子I.I.の写真[23]

すため、Si 撮像素子をもつカメラへの中性子線直接照射を避けるための注意が必要である [21]。

中性子イメージインテンシファイアー(I.I.)

中性子 I.I.[22,23]は、中性子を荷電粒子に変換する中性子コンバータ(2.1.2参照)である ^{10}B または Gd を用いたフォトカソードと電子加速管、蛍光体、カメラからなる。動作は、中性子入射によって発生した電子を加速し蛍光体に打ち込むことで光が発生し、その光をカメラで捉える。この検出器の空間分解能 $100\ \mu\text{m}$ である。有効面積は4インチまたは9インチの2種類ある。東芝電子管デバイス社で製品化され[22](図1.5)、国内の中性子施設である J-PARC、RANS の他に HUNS や KUR などが導入している。この検出器には次のような問題点がある。重量や装置が大きくセットアップの自由度が低い。電子加速管を利用しているため磁場環境下では画像に歪みが生じる。 γ 線に感度がある。時間特性については、残光の短い蛍光体や高速度カメラを使用し時間特性向上の研究が進められている [23]。

nGEM

nGEM(neutron gas electron multiplier)[24–26](図1.6)は中性子コンバーター(2.1.2参照)である ^{10}B とガス電子増幅器である GEM[27]を組合せたガス電子増幅を利用した中性子検出器である。GEMは1997年にCERNで開発され、多くの素粒子物理実験で利用されている [27]。nGEMの動作は、中性子入射によりガス中に発生した電子を GEM で増倍し、それらをストリップ電極で読み出す。特性は、空間分解能は $800\ \mu\text{m}$ 、時間分解能は $15\ \text{ns}$ で TOF 計測に対応する。また、有効面積は $10\ \text{cm} \times 10\ \text{cm}$ 、検出効率10%、計数率 $1\ \text{MHz}$ [28]の特性を持つ。ガス検出器は原子番号の大きい成分を含まないため γ 線に対する感度が低く、中性子

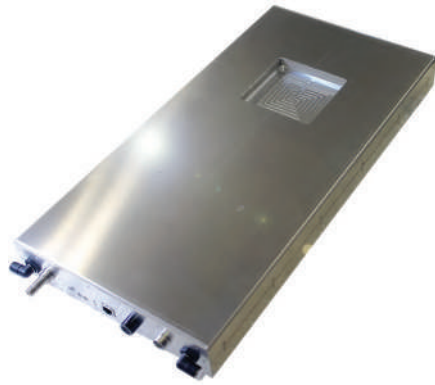


図1.6 nGEMの写真[26]

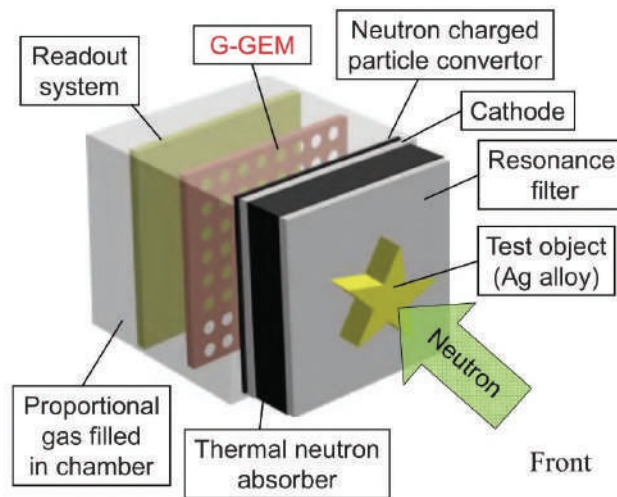


図1.7 G-GEMの概略図[29]

との弁別能が高い。この検出器の問題点は、空間分解能が $800\ \mu\text{m}$ と低い。電子読み出しなので高密度の読み出しができない。CCD や CMOS など電子読み出しができれば高密度化可能であるが、それらは中性子耐性が弱い。また、ガス電子増幅型検出器の安定動作のためには検出器内のガスの純度を高く保つ必要がある。しかし、GEM の材質がガス放出の多い高分子材料であるためガスが汚染されやすく、検出器はガスフロー機構を必要とする。したがって、実験には高圧ガスポンペを準備する必要がある。

G-GEM

G-GEM (Glass GEM) [29](図1.7)はガラス製のGEMを用いたマイクロパターンガス電子増幅検出器である。G-GEMの穴径、穴間隔は、それぞれGEMと同じ、 $70\ \mu\text{m}$ 、 $140\ \mu\text{m}$ であ

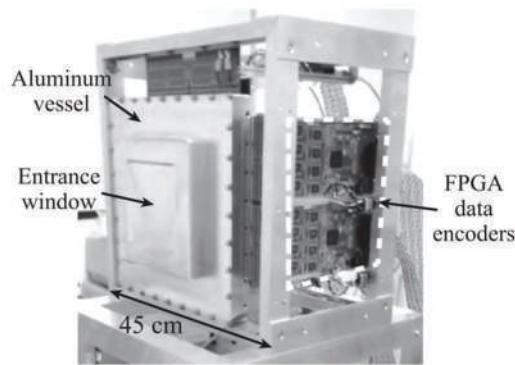


図1.8 μ NIDの写真[31]

るため、空間分解能はnGEMと同程度と推測される。しかし、G-GEMはガラス製であるため、GEMに比べ中性子耐性が強く、ガス放出も少ない。したがって、中性子測定環境下で安定した動作が期待される。ガスシンチレーションによる読み出し、高空間分解能化の研究が進められている[29]。

μ NID

μ NID(micro-pixel chamber based neutron imaging detector)[30,31](図1.8)はマイクロピクセルチャンバー(μ -PIC)を用いたマイクロパターンガス検出器である。中性子コンバーターには ^3He を用い、コンバーターで発生した荷電粒子の飛跡を解析して画像化している。空間分解能は100 μm 、時間分解能は300 nsでTOF計測に対応している。有効面積10 cm \times 10 cm、熱中性子検出効率26%、計数率1 MHzである[28,32]。この検出器は、 ^3He を用いている、取得したデータの画像化に数日を要するという問題がある。 ^3He は熱中性子の検出効率が高く、 γ 線に不感であることから中性子検出器のコンバーターとして利用されてきたが、枯渇が危惧され入手しにくくなり、価格が高騰して代替検出器の開発が望まれている。

^6Li ガラスピクセル検出器、 ^6Li ガラスシンチレーター+位置敏感型光電子増倍管

^6Li ガラスピクセル検出器は、 ^6Li ガラスシンチレーターと光電子増倍管(photomultiplier tube: PMT)やMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)の位置敏感型微弱光検出器を組合せた検出器である[28,33](図1.9)。 ^6Li ガラスシンチレーターは、発光量が6000 photon/neutronとZnS/ ^6Li より少ないが発光減衰時間が75 nsと短い(表1.2)。空間分解能は3 mmである。時間分解能は40 nsでTOF計測に対応している。有効面積5 cm \times 5 cm、熱中性子検出効率23%、計数率6 MHzの特性を持つ[32]。この検出器の問題点は、この検出器はPMTやMPPCなど

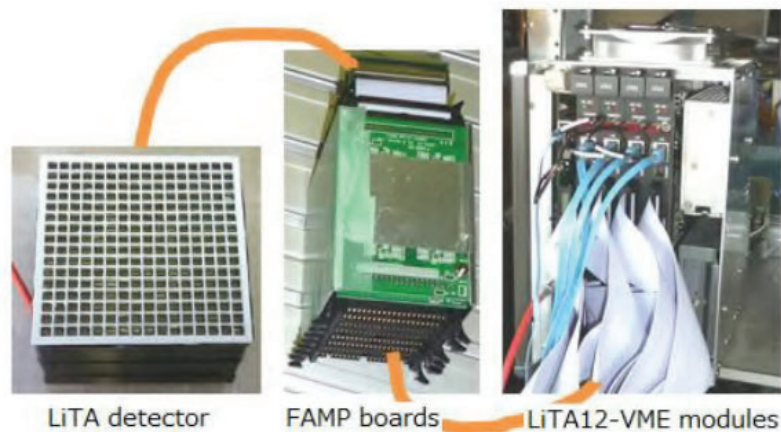


図1.9 ^6Li ガラスピクセル検出器写真[33]

光検出器のアノードの高密度化に限界があるため高空間分解能化は困難である。 γ 線に対する感度も高い。

MCP検出器

MCP(micro channel plate)検出器[34–36]は中性子用MCP(Nova Scientific社製)を用いた検出器である。 ^{10}B を含有したガラスの中性子用MCP(Microchannel Plate)で発生した電子を電子増倍用MCPで電子増倍し、増倍された電子はCERNで開発された電荷読み出しASICチップであるTimepixで読み出される[34]。一般的なTimepixのピクセルサイズは $55\ \mu\text{m} \times 55\ \mu\text{m}$ である。そのため、数 μm の穴径であるMCPは高い空間分解能を有するが、検出器の空間分解能は読み出し部のTimepixのピクセルサイズに依存し、 $100\ \mu\text{m}$ になる。重心演算などの信号処理を行うことにより空間分解能を高めることができる。この検出器の問題は、大面積MCPの製造が支障となり検出器の大面積化が困難なことなどが挙げられる。

工業用X線フィルム+Gdコンバーター

工業用X線フィルム+Gdコンバーターは、工業用X線フィルムでは中性子を捉えることができないため中性子コンバーターであるGdと組合せて撮像を行う。コンバーターと工業用X線フィルムに中性子線を直接照射することで、コンバーターで核反応により発生した内部転換電子によりフィルムが感光する。撮像後、現像してイメージを得る。処理はオフラインで行われる。空間分解能は高く約 $20\ \mu\text{m}$ (Gd: $25\ \mu\text{m}$)である。この手法の問題は、インライン計測・TOF計測には対応できないことや、 γ 線にも感度を持つためノイズ環境

下では使用が難しいことなどが挙げられる。

中性子用イメージングプレート(IP)

IPは、輝尽性蛍光体が塗布されたプレートであり、放射線が照射されると、その線量に応じて蛍光体が励起状態になる。これにレーザーを照射すると発光するため、それを読み取り装置によって画像化する。中性子用IPはGdが添加されている。IPは、フィルムと異なり繰り返し使用でき、画像をデジタルデータとして取り出せる。空間分解能は、読み出し時の励起レーザーのスポット径で決まり約60 μm である。フィルムと同様オフラインで処理するため、インライン計測やTOF計測には対応できない。したがって、この手法の問題は、インライン計測・TOF計測には対応できないことや、 γ 線にも感度を持つことなどが挙げられる。

1.4 既存検出器のまとめと高度化のための障壁

以上の主要な中性子二次元検出器の特徴を図1.10にまとめた。横軸は空間分解能で値が小さいほど分解能は高い。縦軸は時間分解能で値が小さいほど分解能が高い。空間分解能が高い検出器には、工業用X線フィルム+Gdや中性子用IPがあり、数十 μm である。しかし、オフラインで処理を行うため、時間分解能は低い。インラインでの計測を必要とする場合の検出器には、MCP検出器、nGEM、 ^6Li ガラス+光検出器、ZnS/ ^6Li +カメラ、中性子I.I.などがある。これらの検出器は、空間分解能が100 μm 程度である。エネルギー分析に適合するTOF計測が可能な高時間分解能の検出器には、MCP検出器、nGEM、 ^6Li ガラス+光検出器、 μNID などがあり、数十~数百nsである。

検出器に入射した中性子線は検出器内部で複雑な変換過程を経て信号となる。その過程を実現する手法は多数あり検出器ごとに異なっている。中性子線が信号に変換される過程を検出器ごとにまとめたものを表1.3に示す。そして、検出器のさらなる高空間分解能化、高時間分解能化、大有効面積化といった機能の高度化を目指した時に考えられる障壁について検出器ごとに検討を行った。n-GEM、 μNID では、電子読み出しなので高密度の読み出しができない。CCDやCMOSのような電子読み出しができれば高密度化が可能であるが、中性子耐性に課題がある。MCP検出器は、大面積化が困難である。 ^6Li ガラス+PMTでは、PMTのアノードの高密度化に限界がある。中性子I.I.は、価格が高く、大きくて使いにく

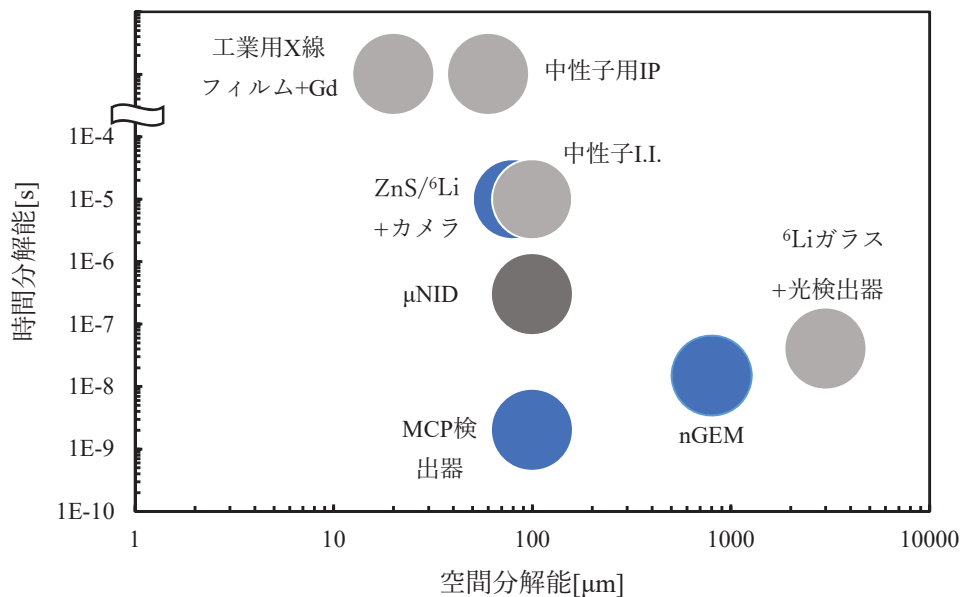


図1.10 主要な中性子二次元検出器の特徴

い。ZnS/⁶Li+カメラは、解像度を高めるにはシンチレーターを薄くする必要があるが、薄くすると検出効率が下がる。これらの検出器に対し、G-GEM、すなわち、ガス電子増幅検出器の光読み出しタイプは高度化のための大きな障壁が見当たらない。したがって、中性子検出器の高解像度化・大面積化を行うには、ガス電子増幅検出器の光読み出しタイプが有望である。

1.5 二次元検出器の開発の方向性

メーカーとユーザーの共通の評価基準が定まっていない状況下では、メーカーとしては既存検出器に対して機能または性能で上回る製品を投入することで価値付加の方向性をユーザーに提案していくことが重要である。現在知られている主な中性子検出方法の中で現像やエッチングなどのオフライン処理を必要とせず、インラインで計測が可能な方法で、実現されている空間分解能は100 μm 程度である。そこで、これを上回る数十 μm の空間分解能の実現を目標とする。

これの実現のために、光読み出し式ガス電子増幅検出器のガス空間を小さく区切ることにより高空間分解能化を行う。ガス領域を小さく区切る手段に、キャピラリープレートがある（第2章参照）。

表1.3 既存中性子二次元検出器の検出方式と高度化時の障壁

既存検出器	入射	変換1	変換2	信号増倍	変換3	読み出し型	空間分解能	高度化における障壁
nGEM	中性子	電子	電子	ガス電子増幅	電子	電荷	1 mm	電子読み出しなので高密度の読み出しができない、 CCDやCMOSのような電子読み出しができれば高密度化可能であるが、中性子耐性がシビアである
100 μm								
μNID					G-GEM	電子	電子	光
MCP検出器	55 μm/pixel	大面積化が困難						
シンチ+PMT,MPPC	中性子		電子	電子	二次電子増倍(MCP)	電子	電荷	50 μm
		50 μm						
中性子I.I.	中性子	電子	電子	光電子増倍	電子	電荷	1 mm～	PMTのアノードの高密度化に限界がある
							100 μm	
高発光シンチレーター	中性子	電子	電子	光(蛍光体)	光(蛍光体)	カメラ	100 μm	価格が高い、大きく使いにくい
							50 μm～ (100 μm)	

1.6 本研究の目的

非破壊検査など中性子線の産業利用の拡大により中性子検出器の世界市場の成長が期待されている。国内では中性子線を利用するための産業基盤が整っていないため中性子検出器の市場は未成熟である。このような状況にある中性子二次元検出器市場にメーカーが新しい製品を投入する時、既存製品と差別化を図り製品の認知度を高めることが重要である。それを足掛りにメーカーとユーザーが試行錯誤し、メーカーとユーザーの間で共通の評価基準が確立していくが重要である。

そこで、本研究では、このような状況にある中性子検出器市場の開拓を目指し、次のことを目的とした。

- キャピラリープレートを用いたガス電子増幅型の中性子検出器の開発を行い、高空間分解能な画像の取得を行う。
- 市場開拓の初期に行うべき戦略をまとめ、それを実践する。

1.7 本論文の構成

本論文の構成を図1.11に示す。序論では中性子線の産業利用における中性子検出器の市場と課題についてまとめ、その上で本研究の目的を述べた。第2章では、本研究の核となる技術である中性子変換材料(コンバーター)とキャピラリープレート (capillary plate: CP) を用いたガス電子増幅型の検出器(CP gas detector: CPGD)の先行研究について述べる。中性子コンバーターは中性子を検出するために必要な材料である。CPGD は荷電粒子を高い空間分解能で検出できる検出器である。第3章では、中性子コンバーターと CPGD などからなるガスシンチレーション方式高空間分解能中性子イメージング装置の開発について述べる。装置の開発は段階的に行い、まず中性子信号の取得を行い、次に高空間分解能化の改良を行った。第4章では、中性子二次元検出器の市場を開拓するための経営理論に基づく市場分析と市場開拓に向けた取り組みについて述べる。最後に第5章にて、本研究全体の結論を述べる。

第1章 序論
第2章 中性子コンバーターと キャピラリープレートガス電子増幅型検出器
第3章 ガスシンチレーション方式 高空間分解能中性子イメージング装置の開発
第4章 新市場開拓の実践
第5章 結論

図1.11 本論文の構成

第2章 中性子コンバーターとキャピラリープレートガス電子増幅型検出器

中性子線のイメージングに利用される中性子二次元検出器は、中性子を荷電粒子に変換する中性子コンバーターと荷電粒子を二次元検出する検出部で構成されている。本章では、次章で述べる開発の基礎となる中性子コンバーターと荷電粒子を高い空間分解能で検出するキャピラリープレートを用いたガス電子増幅型検出器について述べる。

2.1 中性子イメージングに適した中性子コンバーター

電荷を持たない中性子は直接捉えることが困難なため、核反応を用いて陽子や α 粒子のようなエネルギーをもった荷電粒子に変換し検出を行う。核反応を起こす物質が中性子コンバーターであり、核反応する確率は中性子のエネルギーに依存する。

2.1.1 中性子イメージングに利用される熱中性子

ド・ブROIが物質波を提唱して示したように中性子にも粒子性と波動性の二重性が存在する。粒子と物質波の関連を式(2.1)で示す。

$$\lambda = \frac{h}{mv} \tag{2.1}$$

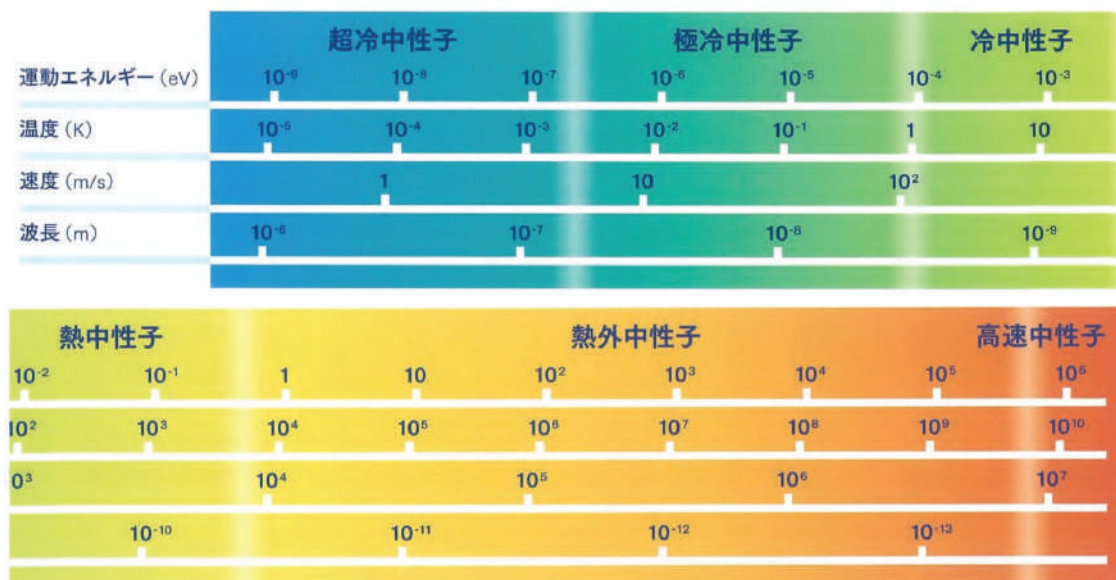


図2.1 中性子のエネルギーの呼び名と単位換算表[37]

ここで、 λ 、 m 、 v 、 h はそれぞれ波長、質量、速度、プランク定数である。運動エネルギーを E としたとき、式(2.2)の関係が成り立つ。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{h^2}{2m\lambda^2} \quad (2.2)$$

この式に基づく中性子のエネルギー、温度、速度、波長の関係を図2.1[37]に示す。例えば、300 K では、中性子の波長は1.8 Å、エネルギーは25 meV となる。この波長は物質を構成する原子間距離に近いので物質の構造を解析するプローブとして最適であり、回折実験やイメージング実験に利用される。この時、周囲の分子の熱運動と平衡状態にあり、熱中性子と呼ばれている。

中性子の呼び名は厳密な分け方は決まっていないが、数100 keV以上を高速中性子、数100 meV以上数100 keV以下を熱外中性子、数meV以上数100 meV以下を熱中性子、数10 μ eV以上数meV以下付近を冷中性子、数100 neV以上数10 μ eV以下を極冷中性子、数100 neV以下を超冷中性子と呼んでいる[37]。このように、利用される中性子線のエネルギー範囲は15桁以上の広がりを持っている。

2.1.2 熱中性子検出用中性子コンバーター

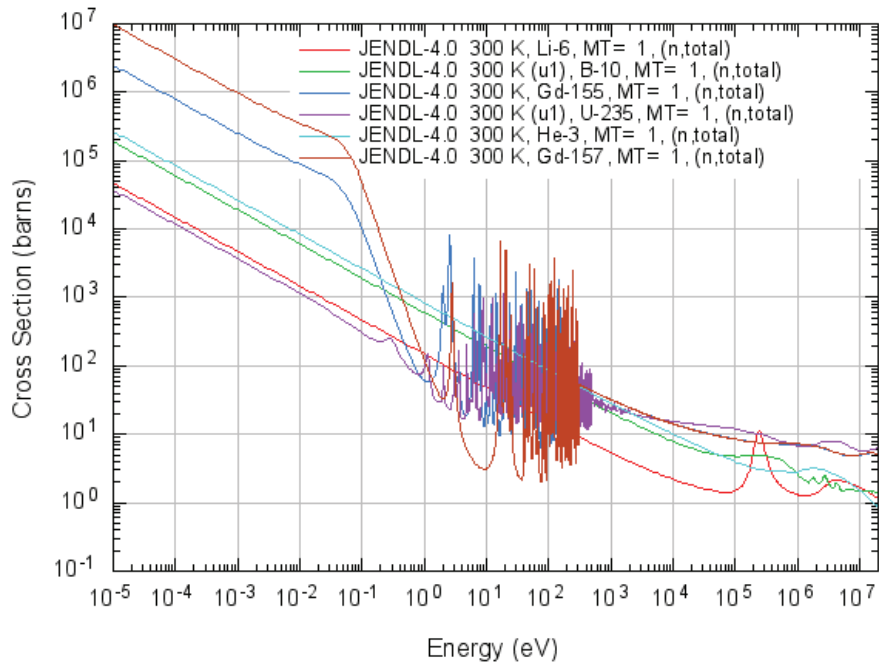
利用される中性子線のエネルギー範囲は広範囲であり、検出には中性子線のエネルギーに適した中性子コンバーターを選択する必要がある。中性子と物質の核反応には中性子捕獲反応と中性子散乱反応がある。

中性子捕獲反応とは、中性子が原子核に捕らえられると中性子過剰な原子核が形成され、荷電粒子を放出するか、 γ 線を放出して安定な原子核になる反応である。中性子検出に良く用いられる核反応を表2.1に示す[38]。また、図2.2に中性子線のエネルギーに対する核反応の反応断面積を示す[39]。横軸は中性子線のエネルギーで単位は eV、縦軸は原子核との反応断面積である。単位の barn は原子核や素粒子との衝突の確率を表した衝突断面積または反応断面積の単位であり、1 barn=10⁻²⁸ m²である。中性子線のエネルギーが低いほど反応断面積は大きい傾向にある。

$^{10}\text{B}(n, \alpha)$ は中性子を捕獲し荷電粒子 $^7\text{Li}^+$ と α 粒子を生成する。25meV の熱中性子に対する反応断面積は3800 barn である。 ^{10}B の同位体の存在度は約20%である。 ^{10}B は安定した膜として存在できるためコンバーターとしてよく利用されている。 $^6\text{Li}(n, \alpha)$ は中性子と反

表2.1 中性子の検出によく用いられる核反応[38] (反応断面積は著者追記)

核反応	反応式(荷電粒子エネルギー)	熱中性子(25 meV) 反応断面積 [barn]
$^{10}\text{B}(n, \alpha)$	$^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li}^+(1.01 \text{ MeV}) + \alpha (1.78 \text{ MeV})$ (6%)	3800
	$^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li}^+(0.84 \text{ MeV}) + \alpha (1.47 \text{ MeV})$ (94%)	
$^6\text{Li}(n, \alpha)$	$^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{H}^+(2.74 \text{ MeV}) + \alpha (2.05 \text{ MeV})$	900
$^{155}\text{Gd}(n, \gamma)$	$^{155}\text{Gd} + n \rightarrow ^{156}\text{Gd} + \gamma \text{ 線} + \text{転換電子}$ (0.039 MeV~0.025 MeV)	60900
$^{157}\text{Gd}(n, \gamma)$	$^{157}\text{Gd} + n \rightarrow ^{158}\text{Gd} + \gamma \text{ 線} + \text{転換電子}$ (0.029 MeV~0.23 MeV)	254000
$^3\text{He}(n, p)$	$^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H}^+(0.19 \text{ MeV}) + p(0.57 \text{ MeV})$	5300
$^{235}\text{U}(n, \text{FF})$	核分裂片(~200 MeV)	600



JAEA Nuclear Data Center

図2.2 中性子検出によく用いられる核反応の反応断面積[39]

応し荷電粒子 ${}^3\text{H}^+$ と α 粒子を生成する。熱中性子に対する断面積は900 barn である。 ${}^6\text{Li}$ の同位体存在度は約7%である。 Li はアルカリ金属であり単体での扱いは難しい。そのため、 ${}^6\text{Li}$ は Li ガラス、 $\text{ZnS}/{}^6\text{Li}$ などシンチレーターとして利用されている(1.3参照)。

${}^{155}\text{Gd}(\text{n}, \gamma)$ 、 ${}^{157}\text{Gd}(\text{n}, \gamma)$ は中性子と反応し転換電子や γ 線を生成する。熱中性子に対する反応断面積はそれぞれ60900 barn、254000 barn と他の物質と比べて極めて大きい。

${}^{155}\text{Gd}$ 、 ${}^{157}\text{Gd}$ の同位体存在度はそれぞれ14.8%、15.7%である。この材料は、大きい反応断面積をもつがノイズとなる γ 線を多く発生するという問題がある。 ${}^3\text{He}(\text{n}, \text{p})$ は熱中性子と反応し ${}^3\text{H}^+$ と p (陽子)を生成する。 ${}^3\text{He}$ の熱中性子に対する反応断面積は5300 barn である。反応断面積も大きく、 γ 線に不感であるため中性子と γ 線弁別性能が高く、ガス電子増幅型検出器のコンバーターとしてもっとも利用されている物質である。 ${}^3\text{He}$ の同位体存在度は0.00014%と非常に小さい。さらに、近年、 ${}^3\text{He}$ 枯渇の危惧により市場価格が急騰し入手が困難な状況にあり、 ${}^3\text{He}$ 代替の要求がある。 ${}^{235}\text{U}(\text{n}, \text{FF})$ は原子炉で中性子の測定に用いられ、中性子と反応し核分裂を起こし大きなエネルギーをもった核分裂片を生成する。熱中性子反応断面積は600 barn である。他のコンバーターに比べ反応断面積が小さい。

中性子散乱反応は、上述の捕獲反応で検出が困難な高速中性子に利用する。主要な反応は ${}^1\text{H}(\text{n}, \text{p})$ 散乱あるいは ${}^1\text{H}(\text{n}, \text{n})$ 反応である。高速中性子が ${}^1\text{H}$ と衝突し運動エネルギーの一部を散乱核に与えて反跳原子核が発生する。その後、散乱を繰り返すことで中性子は減速する。減速した中性子は上述の中性子捕獲反応で検出される。

以上のように、これまでは ${}^3\text{He}$ が中性子コンバーターとしてもっとも用いられてきたが、今後は反応断面積が比較的大きい ${}^{10}\text{B}$ 、 ${}^6\text{Li}$ が中性子コンバーターとして有望である。

2.2 キャピラリープレートを用いたガス電子増幅型検出器

主要な中性子二次元検出器(1.3参照)の中で、ガス電子増幅を利用した中性子検出器である nGEM は、中性子コンバーター ${}^{10}\text{B}$ を使用していた。この検出器は、TOF 計測に対応し(時間分解能15 ns)、 ${}^3\text{He}$ を使用せず、大きな有効面積に対応でき(10 cm \times 10 cm)、ノイズとなる γ 線には低感度(n/γ 比 10^{-6} 以下)であった。したがって、中性子検出器に必要とされる特性を多く満たしていた。しかし、課題として、空間分解能が低い(800 μm)、ガス電子増幅器である GEM の中性子耐性(ポリイミド)などがあった。これらの問題点は、中性子コンバーターではなく、荷電粒子を二次元で検出する部分の課題であった。これらの課題を解決する手法として、櫻井らが提案したキャピラリープレート(Capillary Plate: CP)を用いたガ

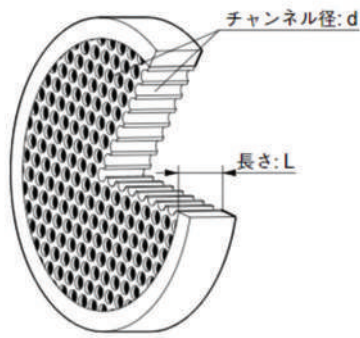


図2.3 キャピラリープレートの構造[40]



図2.4 種々のキャピラリープレート形状 [40]

ス電子増幅型検出器(CP gas detector: CPGD)がある[42]。これはガス電子増幅を CP の各穴で行うものである。以下に、CP、CPGD の動作原理、特徴について述べる。

2.2.1 キャピラリープレート(CP)

CP は、穴径 $4\ \mu\text{m}$ から数百 μm のガラス細管(キャピラリー)が規則正しく二次元に配列されているプレートである(図2.3)[40]。その形状は円形や矩形のものがあり(図2.4)、その大きさは $\phi 5\ \text{mm}$ から $\phi 100\ \text{mm}$ に対応できる。CP は二次元電子増倍でよく用いられているマイクロチャンネルプレート(MCP) [41]と同じ手法で作製される。まず、同じ径のガラス管を規則正しく並ぶように束ねる。次にそれを加熱し引き伸ばす。引き伸ばされるとガラス管の径は細くなる。さらに、引き伸ばした管同士を束ね、加熱し引き伸ばす。これらを繰り返して、穴径を目的の径まで細くしていく。最終的に細管が束ねられた棒状の塊(インゴット)が出来上がる。このインゴットをスライスしたものが CP である。キャピラリーの内壁表面は、MCP に施されているような水素還元処理は行わず、表面抵抗は高い。また、一般に穴の間隔は穴径の約1.3倍程度である[41]。穴と穴との間のガラス(壁)の厚さ t は、穴径 d を用いると、次式で表される。

$$t = 0.3d \quad (2.3)$$

例えば、穴径 d が $50\ \mu\text{m}$ であると、式(2.3)より穴の壁の厚さ t は $15\ \mu\text{m}$ となる。CP の開口率は約60%である。各穴の入り口をテーパ形状にすることで、さらに開口率を高くしたタイプ(90%)もある[41]。

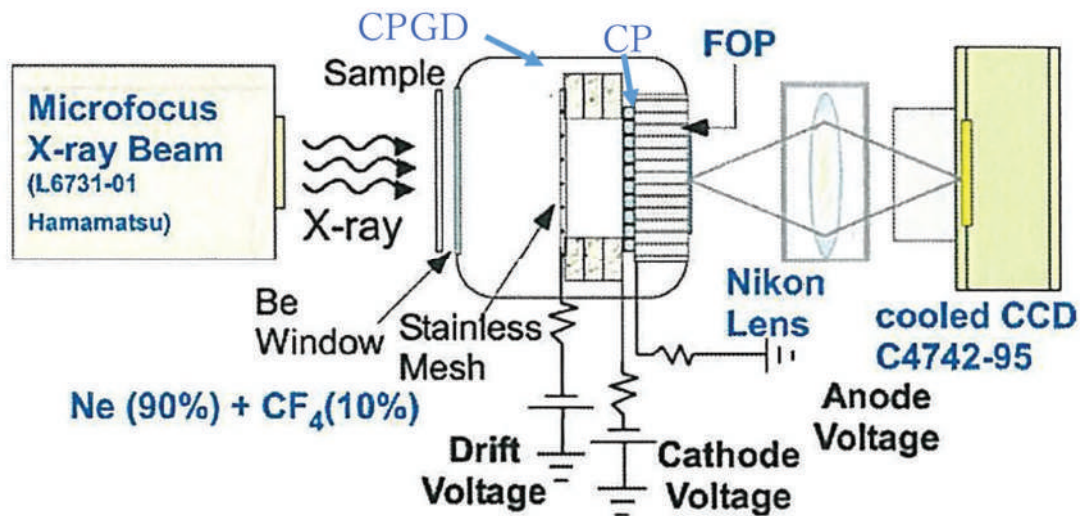


図2.5 X線CPGDの実験セットアップ図[44]

2.2.2 キャピラリープレートガス電子増幅型検出器

櫻井らは開口率が高いガラス製のCPを用いたガス電子増幅型検出器(CPGD)を開発した[42]。これはCPの個々の穴が独立したガス電子増幅部になるガス電子増幅型検出器である。出力の読み出しは、ガス増幅と同時に起こるガスシンチレーション光の撮像により行う[43]。門叶らはガスシンチレーションを利用したX線用CPGDを開発した[44]。実験セットアップ図を図2.5に示す。サンプルを透過したX線がCPGDのガス領域に入射すると、①X線がガス分子を電離し電子が生成され、②この電子がCPの各穴でガス電子増幅されるが、③それと同時にガスシンチレーションにより光が発生し、④その光をCCDで撮像する。以下に各過程の詳細を説明する。

①ガス分子の電離過程

X線や高エネルギー荷電粒子がAr、Neなどのガス中を通過すると、ガス分子との相互作用により、荷電粒子の飛跡に沿ってガス分子を電離し、エネルギーを損失していく。この電離によって電子-イオン対(電離電子)が生成される。電離電子1対あたりの平均生成エネルギーをW値といい、これはガスの種類によって異なる。種々のガスについてのW値を表2.2に示す[45]。物質中のエネルギー損失は、Bethe-Blochの式(2.4)で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi z^2 e^4 n_e}{m_e v^2} \ln \left(\frac{2m_e v^2}{I_{av}} \right) \quad (2.4)$$

表2.2 種々の気体における電子、陽子及び α 粒子のW値[45]

Gas	I (eV)	W_{β} (eV)		W_{α} (eV)		W_p (eV)	W_{β}/I	W_{α}/W_{β}
		Jesse ^{a)}	ICRU ^{b)}	Jesse ^{c)}	ICRU ^{b)}			
He	24.58	42.3	41.3	42.7	←/46.0	45.2 ^{d)}	1.72	1.01
Ne	21.56	36.3	35.4	36.8	←	39.3 ^{d)}	1.70	1.01
Ar	15.75	(26.4)	<u>26.4</u>	26.4	<u>26.31</u>	26.6 ^{d)} /26.66 ^{e)}	1.68	1.00
Kr	14.00	24.2	24.4	24.1	←	23.0 ^{d)}	1.73	1.00
Xe	12.13	22.0	22.1	21.9	←/21.3	20.5 ^{d)}	1.81	1.00
H ₂	15.42	36.3	36.5	36.3	<u>36.43</u>		2.35	1.00
N ₂	15.5	35.0	34.8	36.6	<u>36.39</u>	36.6 ^{d)} /36.68 ^{e)}	2.26	1.05
O ₂	13.55	30.9	30.8	32.5	<u>32.24</u>		2.28	1.05
Air	-	34.0	<u>33.85</u>	35.5	<u>35.08</u>	35.18 ^{d)}		1.04
CO ₂	14.4	32.9	33.0	36.0	<u>34.21</u>	34.37 ^{e)}	2.28	1.09
CH ₄	13.1	27.3	27.3	29.2	29.11	30.5 ^{b)}	2.08	1.07
C ₂ H ₆	11.6	24.8	25.8	26.6	26.5		2.14	1.07
C ₂ H ₄	10.8	26.2	25.8	28.0	27.91		2.43	1.07

*Jesse^{a)}の W_{β} は、アルゴンのW値を26.4 eVとして決定している。

**下線はICRUによる推奨値を表す。

表の引用文献

- a) Jesse, W. P., and Sadauskis, J., *Phys. Rev.*, **97**, 1668 (1955)
- b) ICRU, Average Energy Required to Produce an Ion Pair, ICRU Report 31 (1979)
- c) Jesse, W. P. and Sadauskis, J., *Phys. Rev.*, **90**, 1120 (1953)
- d) Parks, J. E. et al., *J. Chem., Phys.*, **576**, 5467 (1972)
- e) Larson, H. V., *Phys. Rev.*, **112**, 1927 (1958)

ここで、 E 、 x 、 v は、荷電粒子のエネルギー、移動距離、速度、 e 、 ϵ_0 、 m_e は、電気素量、真空の誘電率、電子の質量、 z 、 n_e 、 Iav は、物質の価数、電子密度、イオン化ポテンシャルを表す。 Iav は近似的に $16Z^{0.9}$ (eV)で与えられる。ここで Z は原子番号である。

電離により生成されるおよその電子の個数 n_i は、ガス中で荷電粒子が損失したエネルギー E_d と W を用いて式(2.5)で見積もることができる。

$$n_i = \frac{E_d}{W} \quad (2.5)$$

例えば、1 MeV の α 線が、Ne ガス中で発生させる電子の個数は、表2.2の W_α を適用すると $n = 1 \times 10^6 / 36.8 =$ 約30000個となる。

一方、 γ 線など入射する光子のエネルギーが高くなると、ガス中での相互作用が急激に減少するため[38]、ガス電子増幅検出器は γ 線のような高いエネルギーの光子の検出には適さない。したがって、ガス電子増幅検出器は γ 線に感度が低く、中性子検出器に適している。

②キャピラリープレートによるガス電子増幅過程

CP の上下面に電極を設け、その電極間に電圧を印加することで、CP の各穴に電界ができる。電離電子はこの電界に導かれキャピラリーに進入する。各穴に入った電子はさらに加速されガス分子に衝突し、電離によって更に電子(二次電子)を生成し増えていく。すなわち、ガス電子増幅が起こる。図2.6は CP におけるガス電子増幅の様子をシミュレーションした結果である[46]。この増幅に必要な電界は1気圧のガスでは 10^6 V/m 程度であり、電子の数 n が増加する割合は次のタウンゼントの式に従う[38]。

$$dn/n = \alpha dx \quad (2.6)$$

ここで、 α 、 x は、ガスに対する第1タウンゼント係数、移動距離を表す。平行平板のように空間的に一定の電界であれば、タウンゼントの式の α は定数であり、電子密度は式(2.7)のように距離とともに指数関数的に成長する。適当な条件の元では二次電子は一次電子の数に比例して数千倍に増幅される。

$$n(x) = n(0)e^{\alpha x} \quad (2.7)$$

図2.7は、CPGD のガスを Ar(90%)+CF₄(10%)または Ne(90%)+CF₄(10%)としたときの CP 電極間印加電圧に対するガス電子増幅度である[44]。このときのガスの圧力は1気圧である。ガス種や CP 電極間印加電圧によりガス電子増幅度は異なる。Ar(90%)+CF₄(10%)は1000 V で 10^3 の増幅度があり、Ne(90%)+CF₄(10%)は印加電圧650 V で 10^4 の増幅度がある。

CP と GEM の比較を表2.3に示す。ガラス製である CP は、ポリイミド製の GEM より耐電圧に優れ、ガス電子増幅度は GEM の 10^2 に対し CP は 10^{3-4} と高い。この他にも次のようなことが期待される。CP はガス放出が少ないため検出器動作時にガス汚染が少なく、安定した動作や封じ切り型でガスフロー不要の形状が可能である。CP の穴と穴の間隔は穴径

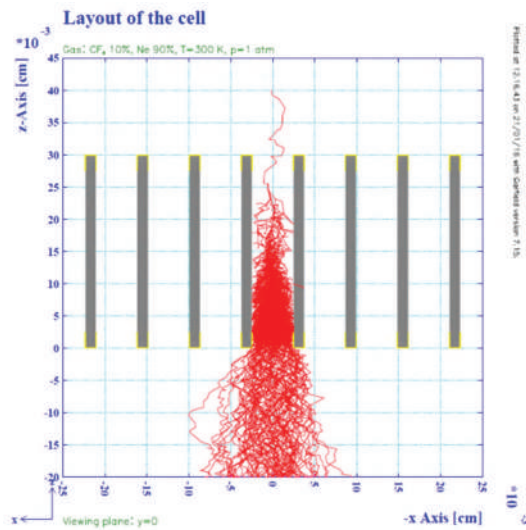


図 2.6 CP によるガス電子増幅シミュレーション

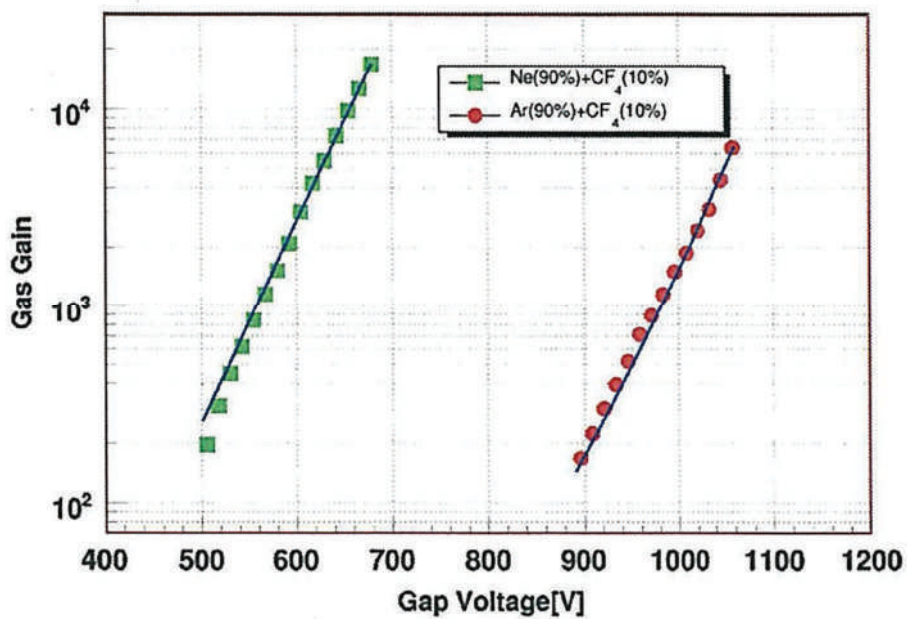


図2.7 混合ガスNe(90%)+CF₄(10%)とAr(90%)+CF₄(10%)のCP電極間印加電圧に対するガス電子増幅度(CP厚さ400 μm)[44]

の約1.3倍(例:穴径50 μm、間隔65 μm)で穴間隔140 μm の GEM より狭い。そのため、開口率は、GEM の40%に対し60%と高い。CP の材質はガラスであるため中性子に耐性がある。以上のことから、CP をガス電子増幅部としたガス電子増幅検出器(CPGD)は、高空間分解能、高い電子増幅度、安定動作などの特徴を持つ二次元検出器である。更に、ガス電子増幅で

表 2.3 中性子検出器の電子増幅部としての比較

	CP	GEM[27]
材質	ガラス	ポリイミド
耐電圧	高い	低い
ガス放出	少ない	多い
中性子耐性	○	×
穴径[μm ϕ]	数~数百 例:50	70
穴間隔[μm]	穴径 \times 1.3 例:65	140
開口率[%]	60	~40
ガス増幅度	10^{3-4}	10^2

あるため γ 線に低感度であり、ガラス材がポリイミドなどの樹脂材に比べ中性子耐性を持つことから中性子検出器として適している。

③ガスシンチレーション過程

CPGD は信号の読み出しに特徴がある。CPGD の出力は、nGEM のようにガス電子増幅された電子を電荷として読み出すことも可能であるが、光で読み出すことも可能である。光で読み出す場合は、ガス電子増幅により発生した電子がガス分子を励起し、その励起分子がいろいろな過程を介して基底状態に戻る際に放出される光を利用する[38]。このガス電子増幅時に光が放出されることをガスシンチレーションという。これは通常のシンチレーターに比べて光の発生量が多い点が特長である。光子は複数の分子励起状態から基底状態への遷移により放出される。これらの遷移の多くは非常に短い時間(2-3 ns かそれ以下)に起きる。放出された光子の多くは可視領域よりも紫外線領域に多い。紫外線領域のシンチレーション光を検出するのは困難なため、 CF_4 などの第二のガスを添加することにより、紫外線を吸収し、より波長の長い光子を再放出させる。1気圧の $\text{Ne}(90\%)+\text{CF}_4(10\%)$ の混合ガス発光スペクトルは300-900 nm であり(図2.8)[44]、この波長は CMOS、CCD 素子に感度がある。この混合ガスにおける二次電子量に対する光子の発生割合は0.06である[44]。

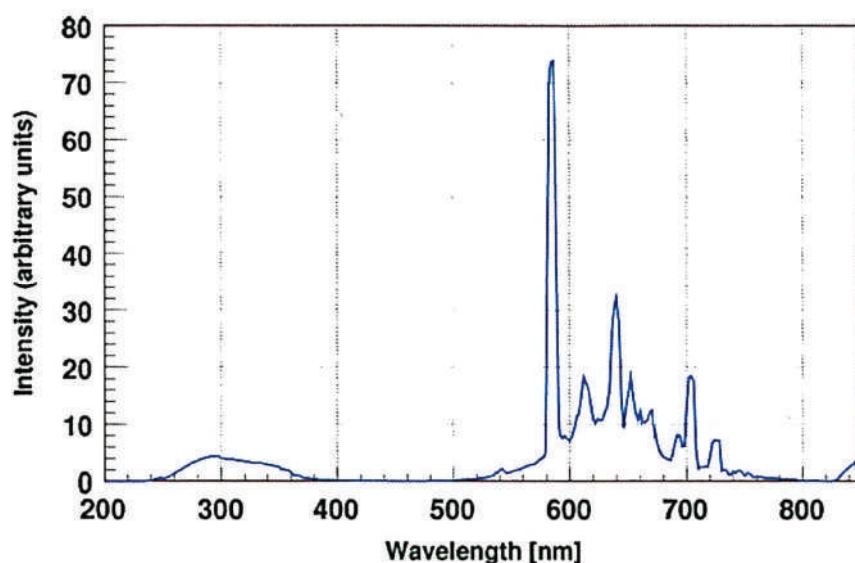


図2.8 混合ガスNe(90%)+CF₄(10%)におけるガスシンチレーションの
発光スペクトル[44]

このガスシンチレーションはガス電子増幅と同時に起こり、発光強度は電子増幅度に比例する[47]。増幅度はCP電極間の印加電圧と関係がある。したがって、CPGDはシンチレーション光の強度をCP印加電圧で調整することができる。

また、CPGDのシンチレーションの発光減衰時間は、1気圧のAr(90%)+CF₄(10%)の混合ガスでは200 ns以下である[43]。これはZnS/⁶Li(表1.2)より1桁以上短く、時間分解能を必要とする計測への適応範囲が広がる。

④CCDによる撮像過程

CPで発生したシンチレーション光はレンズを通してCCDに結像され、二次元像として記録される。CCDは高感度カメラや高速カメラなど目的に合わせて選択し、露光、積算などの撮像条件を設定して使用する。

2.2.3 CPGDの空間分解能

CPGDの空間分解能に影響を与える主要な要素について、X線CPGDの先行研究を例に挙げて説明する。X線検出用CPGD(図2.5)は、検出器の入射窓とCPの間にあるメッシュ電極電位(以降、メッシュ電位)とCP入口電位を変更することで空間分解能の異なる像が得られている(図2.9)[44]。(a)メッシュ電位がCP入口電位より低い場合、X線が検出器に入射し、メッシュとCPの間の領域で生成された電子はCP方向へ移動し、複数の穴に別れて入

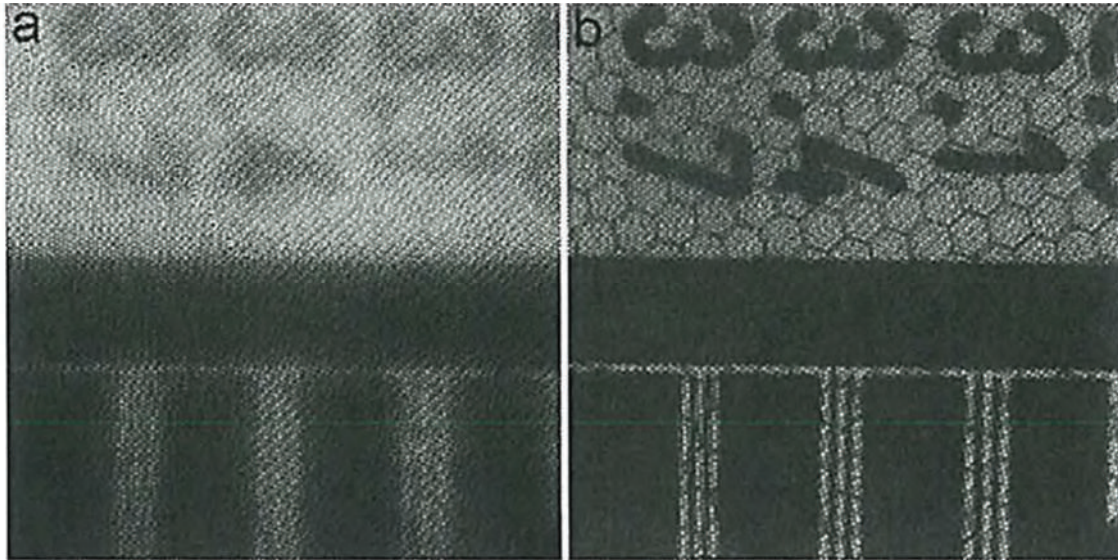


図2.9 X線 CPGD で得られた解像度チャートの X線透過像[44] (a)メッシュ電極と CP との間の領域に発生した電子を増幅し得られたイメージ (b)CP の穴の入り口付近に発生した電子だけを増幅し得られたイメージ

り増倍される。(b)逆にメッシュ電位の方が CP 入口電位より高い場合、生成された電子はメッシュ側へ移動し、CP の入口付近で発生した電子だけがガス電子増幅される。a の場合、増倍される電子数は b の場合より多いので明るくなるが、取得したイメージはぼやけた像となる(図2.9(a) 空間分解能3.1 lp/mm)。一方、b の場合、X線が入射した CP の穴だけが光るため、空間分解能の良い像が得られる(図2.9(b) 空間分解能3.7 lp/mm)が電子数は少なくなるため像は暗くなる。

b の場合では空間分解能は CP の穴径、穴間隔で決まる。図2.5の CP の穴径は100 μm 、穴間隔120 μm であり、このとき空間分解能は135 μm が得られている[44]。穴径50 μm の CP を用いた X線 CPGD の先行研究[43]では約55 μm の高空間分解能が報告されている[48]。すなわち、CPGD の限界空間分解能は穴径や穴間隔で決まる。したがって、より高い空間分解能を得るには、穴径、穴間隔を小さくし、さらに個々の穴で発生した電子のみをガス電子増幅させることが重要である。

以上、CPGD の動作と特徴について述べた。CPGD は、 γ 線に低感度、高いガス電子増幅度、高空間分解能、シンチレーションの発光強度可変、高い時間分解能といった特徴があり、更に、中性子線への耐性もあるため、中性子二次元検出器のガス電子増幅部として極めて有望である。

2.3 第2章まとめ

第2章では、本研究における開発の基礎となる中性子コンバーターと CPGD について述べた。

- 熱中性子ガス電子増幅検出器に適している中性子コンバーターは ^{10}B である。
- CPGD は、高空間分解能、高い電子増幅度、安定動作などの特徴を持つ二次元検出器である。更に、 γ 線に低感度、材料の中性子耐性もあることから中性子二次元検出器として極めて有望である。

次章では、中性子コンバーター ^{10}B と CPGD を組合せたガスシンチレーション方式高空間分解能中性子イメージング装置の開発について述べる。

第3章 ガスシンチレーション方式高空間分解能中性子イメージング装置の開発

本章では中性子コンバーターと、キャピラリープレートガス電子増幅型検出器(CPGD)を組み合わせた中性子ガス電子増幅型検出器(n-CPGD)の開発について述べる。さらに、それとカメラを組合せ、ガスシンチレーション方式中性子イメージング装置(n-GSI)を構築し、中性子イメージの取得を行った。さらに、より高い空間分解能を得るための方策の検討についても述べる。

3.1 中性子検出用のキャピラリープレートガス電子増幅型検出器の原理

中性子検出用 n-CPGD の開発にあたり、まず、中性子コンバーターからガス中に放出される荷電粒子数の最大化を行った。次に高空間分解能を達成するためにガス中に放出された荷電粒子の飛跡を制御する方策の検討を行った。

3.1.1 中性子コンバーターの変換効率と膜厚最適化

第2章で熱中性子用の中性子コンバーターは ^{10}B が最適であるとわかった。中性子検出器は熱中性子との核反応により生成された荷電粒子を検出するため、ガス中に放出される荷電粒子数が検出器の検出効率に大きく影響する。荷電粒子の ^{10}B 内の飛程は数 μm であるため、 ^{10}B の膜厚が厚すぎると荷電粒子はガス中に飛び出すことができない。逆に薄すぎると中性子が ^{10}B を素通りするため荷電粒子が発生しない。したがって、 ^{10}B の膜厚には最適値が存在する。そこで、20 meVの熱中性子が ^{10}B 膜に入射し透過側に放出された荷電粒子の数をモンテカルロ計算コード PHITS[49]を用いてシミュレーションを行い、最適値を探索した(図3.1)。図3.1の横軸は ^{10}B 膜厚であり、縦軸は中性子1個あたりの ^{10}B 膜から透過側に放出される荷電粒子数である。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 核反応で発生する荷電粒子には α 粒子と $^7\text{Li}^+$ があり、双方とも信号検出に寄与する。図3.1にはこれらを合計した数もプロットしてある。 $^7\text{Li}^+$ 、 α 、 $\alpha + ^7\text{Li}^+$ の放出数が最大となる膜厚はそれぞれ、1.5 μm 、3 μm 、3 μm であった。このシミュレーション結果では、透過側への荷電粒子の放出数が最大となる ^{10}B 膜厚は3 μm であり、このときの中性子1個あたりの荷電粒子放出数は約0.06個であった。したがって、中性子コンバーターの変換効率を透過側にあるガス領域への荷電粒子放出数/入射中性子数とすると、20 meVの熱中性子における ^{10}B の薄膜の変換効率は、膜厚3 μm のときに最大の約6%になると推定される。

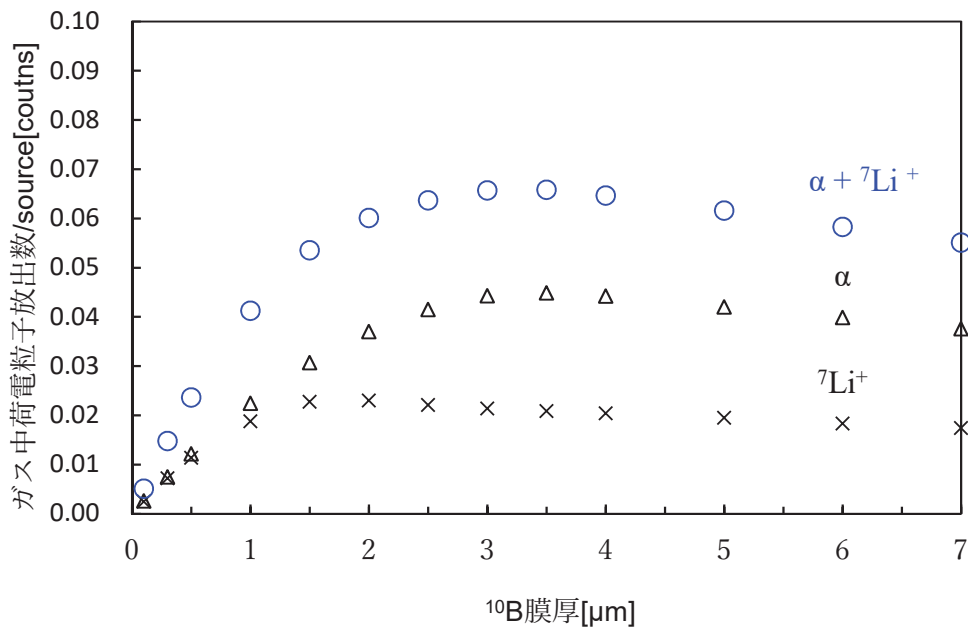


図3.1 モンテカルロ計算コードPHITSによる ^{10}B の膜厚に対するガス領域への荷電粒子放出数のシミュレーション 熱中性子(20 meV)では膜厚約3 μm 付近でガス中への荷電粒子放出数が最大となる

3.1.2 ガス中に放出された荷電粒子の拡がり

図3.2はガス電子増幅検出器における $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ の核反応の概略図を示す。コンバーター(^{10}B 薄膜)に中性子が入射すると、核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ が起こり、全球方向に荷電粒子(α および ${}^7\text{Li}^+$)が放出される。放出された荷電粒子は、 ^{10}B 膜やガス分子などと相互作用してエネルギーを損失しながら飛翔し、運動エネルギーを全て失ったところで止まる。式(2.4)より ^{10}B などの固体中では α 線の飛程は数 μm であるが、1 atmのNeガスやArガスなどの分子密度の低いガス中では約1 cmと長くなる。すなわち、荷電粒子に起因する電子発生領域が広がるが、これを狭い領域に閉じ込めることが可能となれば高い空間分解能が実現できる。

荷電粒子の拡散を制限するには、固体壁で止める、ガス空間に強い電界を印加し方向を制御する、などが考えられる。100 μm 以下の空間分解能を目指すとき、固体壁で止める場合には、壁(数 μm 以上の厚さ)を少なくとも100 μm 以下の間隔で並べる必要がある。電界を利用する場合は荷電粒子である α 線や ${}^7\text{Li}^+$ がMeVの大きなエネルギーを持つため、制御するには 10^6V 以上の高電圧を印加する必要がある。しかし、ガス中でそれだけの高電圧を

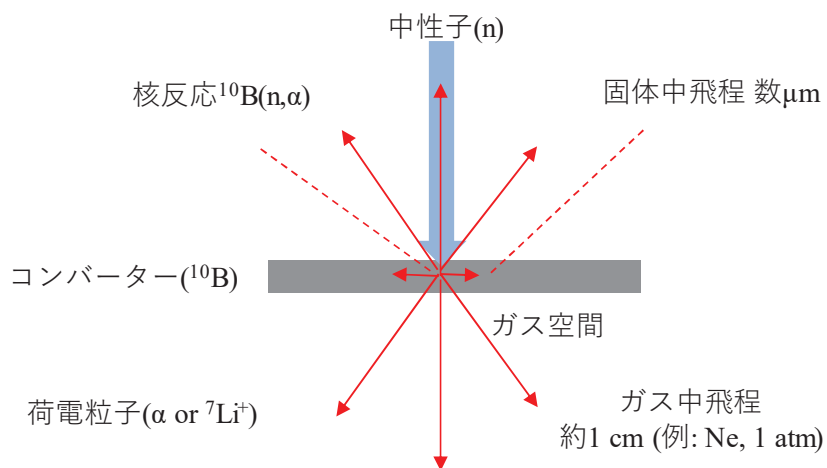


図3.2 中性子とコンバーターとの核反応による荷電粒子の放出

印加することは放電が起こるため不可能である。一方、固体壁による拡がり制限は CP を用いることで100 μm 以下の間隔で壁を設置することは実現可能である。

3.1.3 荷電粒子を止めるキャピラリープレートの壁の厚さ

CP や MCP(2.2.1参照)の壁は、核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ で発生した荷電粒子を止め、隣接する穴へ荷電粒子が突き抜けないようにする必要がある。そのようなキャピラリーの壁の厚さを求めた。表2.3より核反応で発生する荷電粒子 α 線、 $^7\text{Li}^+$ のエネルギーは、それぞれ1.47 MeV、0.84 MeVである。式(2.4)よりガラス中の α 線の飛程は約5 μm であり、 $^7\text{Li}^+$ はやや短い。そのため、荷電粒子が隣の穴に突き抜けないようにするには、穴の壁の厚さは5 μm 以上にする必要がある。ところで、壁の厚さ t と CP の穴径 d には式(2.3)の関係があることから、 $t=5 \mu\text{m}$ では $d=17 \mu\text{m}$ 程度が得られる。すなわち、壁の厚さが 5 μm のとき穴間隔は22 μm であり、ほぼこの値に匹敵する空間分解能が期待できる。

3.1.4 キャピラリープレートガス電子増幅型検出器の仕様

CPGD の特性を決める要素にはガス電子増幅部である CP の穴径、ガスの種類、その圧力などがあつた。前述のように荷電粒子の壁として機能する CP の最小壁厚さは5 μm であり、その際の穴径は17 μm 程度であつたが、n-CPGD の原理検証を優先させ、CP の仕様としては先行研究[44]で実績のある値を採用した。すなわち、CP 穴径50 μm 、CP 厚み300 μm 、ガス圧1 atm、ガス種 Ne(90%)+CF₄(10%)とした。この仕様で期待される空間分解能は約50

μm 、ガス電子増幅度は 10^{3-4} である[44]。

ところで、ガス電子増幅型検出器では、ガスの純度が検出器の特性に影響を与える。しかしながら、内部構造の材料から発生する不純ガスにより電子増幅用ガスの純度が低下することがある。したがって、一般のガス電子増幅型検出器にはガスを循環させる機構を備える必要があり、システム全体として大型化してしまう。そこで、検出器を構成する材料に不純ガスの放出の少ないものを使用し、ガス循環を不要にすることでチャンバーの密封化を目指した。これにより、使い勝手が大きく向上することが期待できる。

3.2 ガスシンチレーション方式中性子イメージング装置の開発

3.2.1 中性子ガス電子増幅型検出器

以上の検討に基づき中性子コンバーター、CPGD、密封チャンバーからなる n-CPGD を開発した。概略図を図3.3に示す。密封チャンバーには中性子の入射窓とガラス製の光出射窓があり、内部に CP(図3.4)が設置されている。入射窓には膜厚 $3\mu\text{m}$ の ^{10}B コンバーターが成膜されている。チャンバーは1気圧の $\text{Ne}(90\%)+\text{CF}_4(10\%)$ の混合ガスで満たされている。CPの上下面にはそれぞれ導電膜が蒸着されており、コンバーター、CP上面、CP下面には、コンバーター < CP 上面 < CP 下面の順になるように電圧を印加して用いる。

図3.5に n-CPGD の動作原理図を示す。①中性子が窓から入射すると、 ^{10}B との核反応によって荷電粒子(α 線:1.47 MeV および $^7\text{Li}^+$ 核:0.84 MeV)が生成されガス中に放出される。荷電粒子はガス中を通過すると、ガス分子と相互作用し、エネルギーを損失する。式(2.4)により求められるエネルギー損失量を元に計算すると、1.47 MeV の α 線の Ne ガス中での飛程は約1 cm である。荷電粒子が穴の壁であるガラスに入射すると速やかにエネルギーを損失しガラス壁内部で止まる。②荷電粒子の飛跡に沿って電離による電子イオン対(電離電子)が生成される。生成される電子のおよそ数は式(2.5)より概算できる。③キャピラリーに入った電子及びキャピラリーの内側で発生した電子は、CP 上下面間の印加電圧により形成された電界によって、ガス電子増幅される。このときのガス電子増幅度は 10^{3-4} である(2.2.2参照)。④ガス電子増幅と同時にガス分子の脱励起によってシンチレーション光が放出される。この混合ガスにおける二次電子量に対する光子の発生割合は0.06である(2.2.2参照)。このシンチレーション光はガラス窓を通過し、CMOS カメラや CCD カメラなどに入射し、記録される。記録される光学イメージは、荷電粒子がガス中でエネルギーを損失した場所を可視化し、荷電粒子の飛跡または CP の個々の穴からなるイメージとなる。

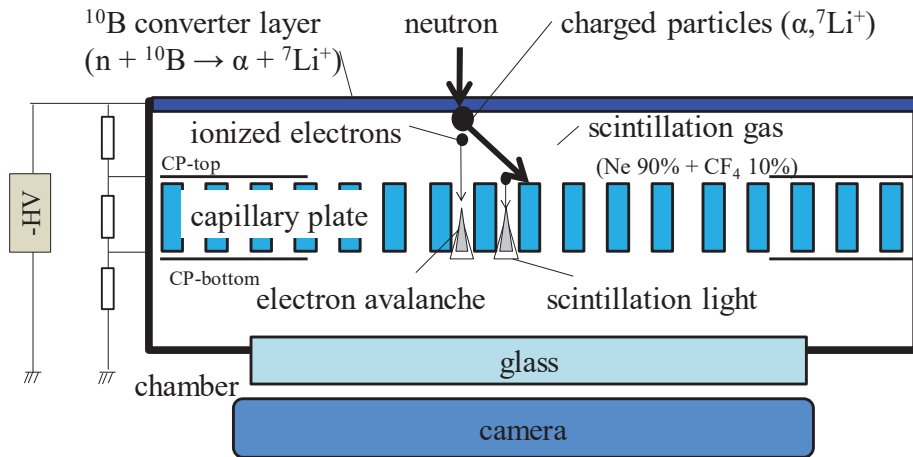


図3.3 n-CPGDの概略図

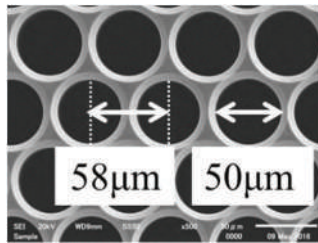


図3.4 CPのSEM像 穴径50 μm 、穴間隔58 μm 、壁厚8 μm

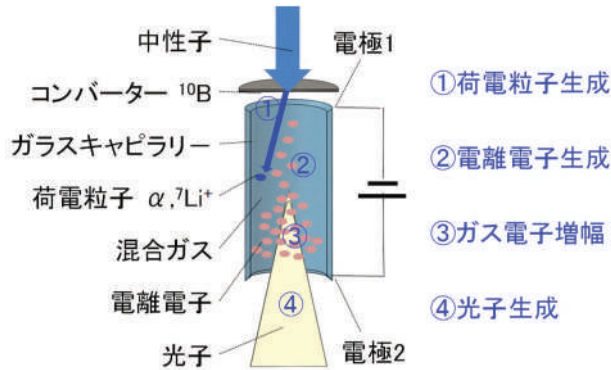


図3.5 n-CPGDの原理

開発した n-CPGD の仕様を表3.1に示す。コンバーター ^{10}B の膜厚、CP、ガス種、ガス圧は上述と同じである。コンバーターと CP の間の間隔は300 μm であった。

3.2.2 中性子イメージング装置

n-CPGD で発生したシンチレーションイメージの読み出しのために、図3.6のようなミラー、カメラレンズ、イメージインテンシファイアー(I.I.)ユニット、カメラからなる中性子

表3.1 n-CPGDの仕様

項目	仕様
コンバーター	^{10}B 膜厚 3 μm 、直径 18 mm
CP	穴径 50 μm 、穴間隔 58 μm 、厚さ 300 μm 、 CPの外径 33 mm
ガス種 ガス圧	Ne(90%)+CF ₄ (10%) 1 atm
コンバーターとCP間距離	ギャップ 300 μm

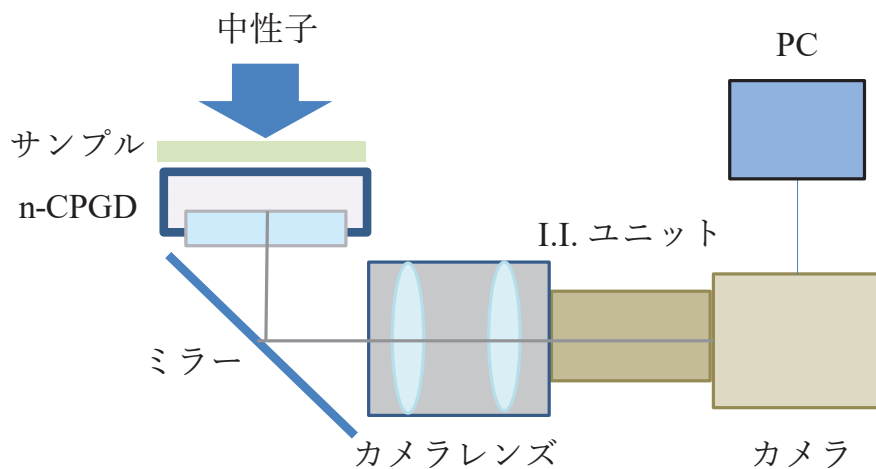


図3.6 ガスシンチレーション方式中性子イメージング装置(n-GSI)の概略図

イメージング装置を構築した。n-CPGD で発生した光は、ガラス窓を通り、カメラレンズにより集光され、カメラの撮像素子表面に結像される。半導体が多用されているカメラは γ 線や中性子線などに影響を受けやすく、ノイズ増や故障が生じる危険性が高い。これを防ぐために光学系の途中をミラーで90度折り曲げカメラを遮蔽材の背後に隠せるようにしている。n-CPGD の発光量が小さい場合には、レンズとカメラの間に I.I.ユニットを設置し光増強を行う。これらの具体的な構成は次のとおりである。カメラレンズ:AI Nikkor 50mm f/1.4S、s-CMOS カメラ:C13440-20CU(浜松ホトニクス製)、I.I.ユニット:C9016-02+A4539(浜松ホトニクス製)。C13440-20CU は、量子効率約80%@600 nm、画素サイズ6.5 μm ×6.5 μm 、画素数2048×2048、1.0 electron の低ノイズの特徴をもった高感度冷却カメラであり、これによる画像取得は、画像取得ソフトウェア U8913-01(浜松ホトニクス製)を用いた。このソフトウェアでは、露光時間の変更、画像の積算および画像補正(バックグラウンド減算、シ

シェーディング処理)等が行える。s-CMOS カメラの露光時間は、1 ms から10 s まで可変である。画像の積算は、1フレームあたりの信号が少ない場合に用いる。露光時間×回数で画像取得時間が得られる。例えば、10 s 露光の画像を30回積算すると、300 s の積算画像が得られる。ソフトウェアによるバックグラウンド減算は、画像のバックグラウンド(背景画像)を除去することができる補正機能である。この機能を実行すると、カメラ由来の暗電流や不要な背景光、逆光等によるオフセット信号を除去することができるため、画像の被写体をより鮮明に表示することができる。シェーディング処理は、画像の明るさを均一にする補正機能である。この機能を実行すると、画像取得した際の照明ムラやレンズのシェーディング等による感度ムラを除去し、均一な明るさで画像を表示することができる。I.I.ユニットの光増強度はゲインのダイヤル値により 10^2 - 10^6 で可変である。

3.2.3 検出器の中性子照射実験

開発した中性子イメージング装置(n-GSI)を用いて中性子線イメージング実験を行った。実験には京都大学小型加速器型中性子線源(KUANS)[50]を用いた。中性子線は加速器で加速された P^+ がターゲットである Be に衝突することにより、核反応が生じ生成される。さらに、ポリエチレンモデレーターによって減速され熱中性子となる。加速器ベースの線源である KUANS は高速中性子成分が比較的高く、Li ガラスシンチレーターを用いて得られた熱中性子強度と約100 meV を超える中性子強度の比[50]は、約1:5であった。n-GSI は中性子線源の出口に設置され(図3.7)、n-GSI とモデレーター表面との間の距離は3.06 mであった。この距離と Li ガラスシンチレーターを用いて得られた中性子強度から、n-GSI 設置位置での熱中性子強度は $450 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ と算出された。

3.2.4 中性子照射実験結果と考察

このセットアップを用いて中性子が n-GSI に入射したときの応答を調べた。 $\square 10 \text{ mm}$ の開口部を持つ B_4C ゴム、および「イ」の字型の開口部を持つ Gd 板をサンプルとして中性子像を撮像した。

B_4C ゴム $\square 10 \text{ mm}$ 開口の中性子線シングルイベントの信号

図3.8左に示す黒色の B_4C シリコンゴム板の中央に $\square 10 \text{ mm}$ の開口部を持つサンプルを検出器の入射窓のすぐ前に配置した。 B_4C シリコンゴムは熱中性子を遮蔽する。コンバーターと CP 上面間、CP 上下面間の印加電圧はそれぞれ-20 V、-615 V であり、この印加電圧

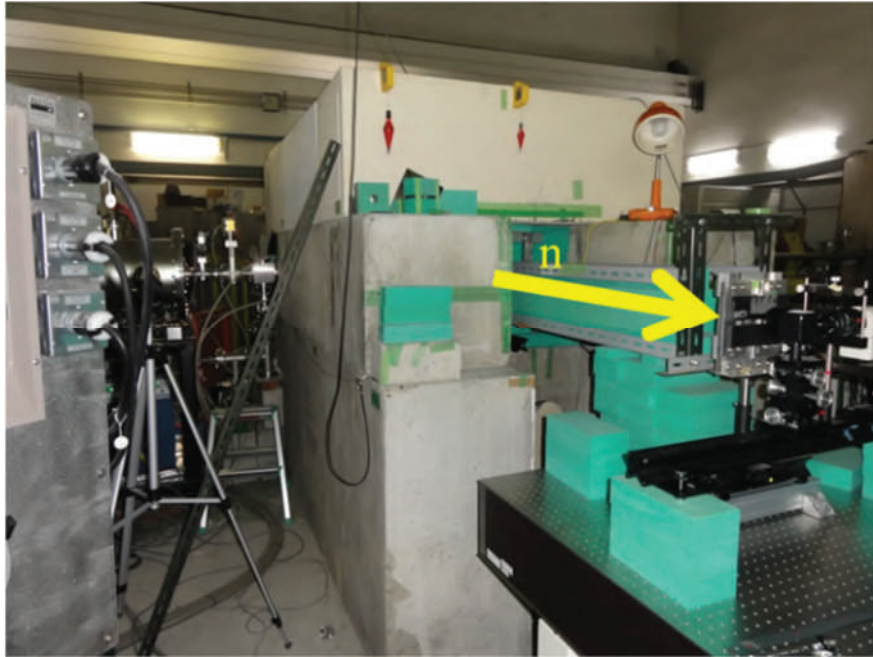


図3.7 KUANS[50]における実験セットアップ

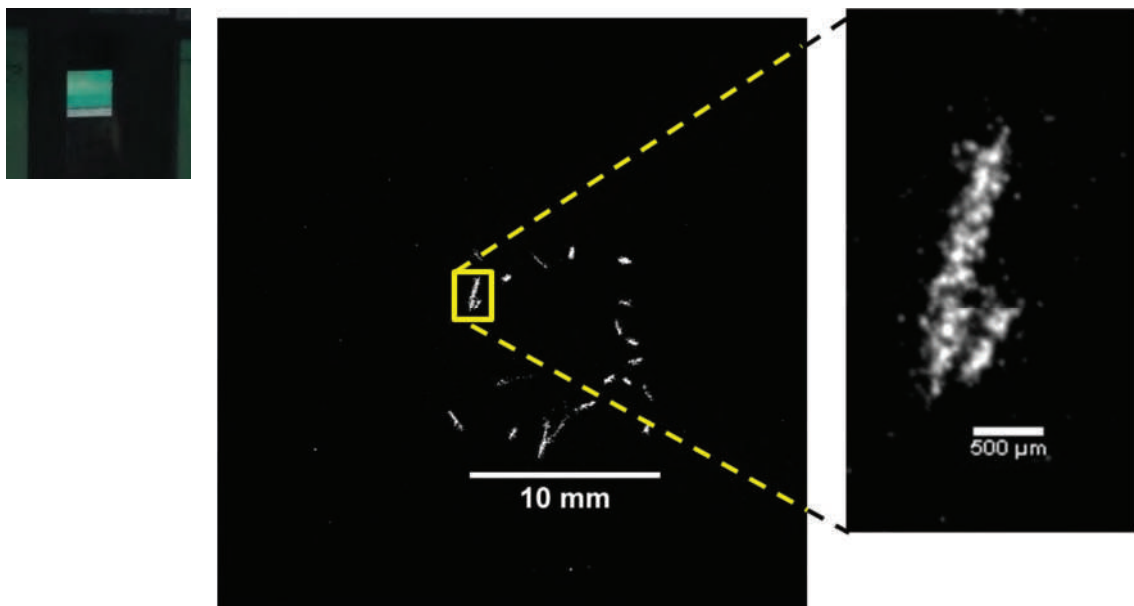


図3.8 B₄C ゴム開口部を用いて得られた露光時間1秒の中性子像

における CP の電子増幅度は 10^3 であった。中性子照射時の画像を露光時間1秒で100枚取得した。同様に比較用に中性子を照射していないときの画像も取得した。

その結果、中性子照射時に図3.8中央に示すような画像を取得した。画像上の信号(輝点)はサンプルの開口領域に対応する $\square 10\text{ mm}$ の内側に平均19個観測された。中性子を照射していないときの信号は平均0.8個であった。一つ一つの信号の形は点状ではなく線状に見え

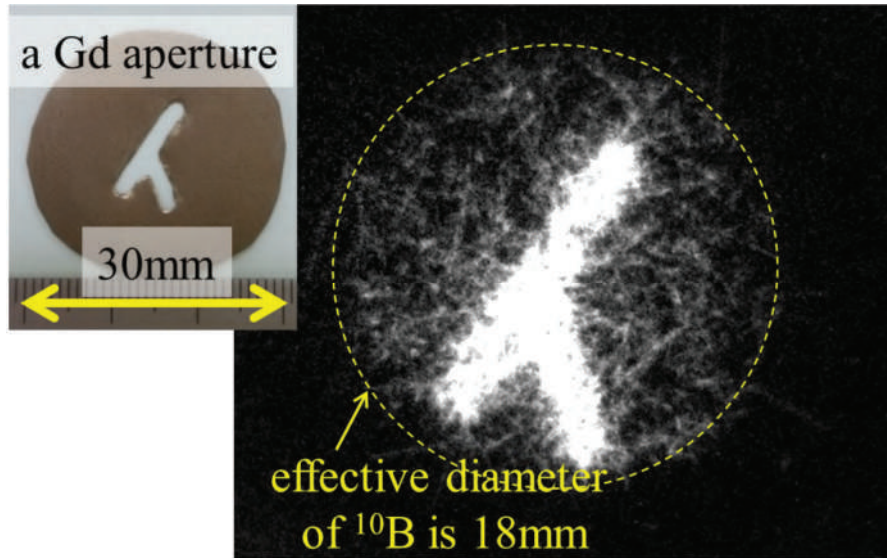


図3.9 Gd 開口部を用いて1秒露光の画像を180回積算した中性子像

た。それぞれの線の長さは同じではなく長さが異なっていた。図3.8の右は得られた信号の一つを拡大したものである。一つの信号の大きさは CP 穴径である $50\ \mu\text{m}$ より大きかった。これらの線状の信号は、CP 上面に投影された荷電粒子飛跡像であると考えられる。つまり、一つの中性子入力に対し、複数の穴が同時に発光した。

サンプルの開口領域内で観測された平均19個/sの輝点を中性子の信号とみなし、検出器設置位置での中性子強度約 $450\ \text{n/cm}^2/\text{s}$ と比較すると検出効率は約4%と推定された。これは、3.1節で予想した検出効率約6%の値に近く、中性子が検出された時の効率として妥当な結果である。

Gd板「I」の字開口の中性子線積算画像

上記のように、このセットアップで $19\ \text{個/cm}^2/\text{s}$ の中性子信号が得られた。二次元イメージを取得するためには数百秒の露光時間が必要であると考えられる。そこで、入射中性子に対し露光時間1秒のイメージを180回積算した。入射窓の前に図3.9の左上に示した片かなの「I」の字型の開口がある Gd 板サンプルを設置した。厚さは $0.25\ \text{mm}$ である。Gd は熱中性子を遮蔽する材料である。その結果、「I」の字型の画像が得られた(図3.9右)。

得られた画像には、開口の形状以外の場所にバックグラウンド信号が存在していた。これらの信号は直径 $18\ \text{mm}$ の円の内側領域に限定されており、入射窓に ^{10}B 膜が形成されている領域と等しかった。したがって、すべての信号は ^{10}B 層から生成されたと考えることができる。また、KUANSで発生する中性子は高速中性子を含む一方、 $0.25\ \text{mm}$ 厚の Gd では高速

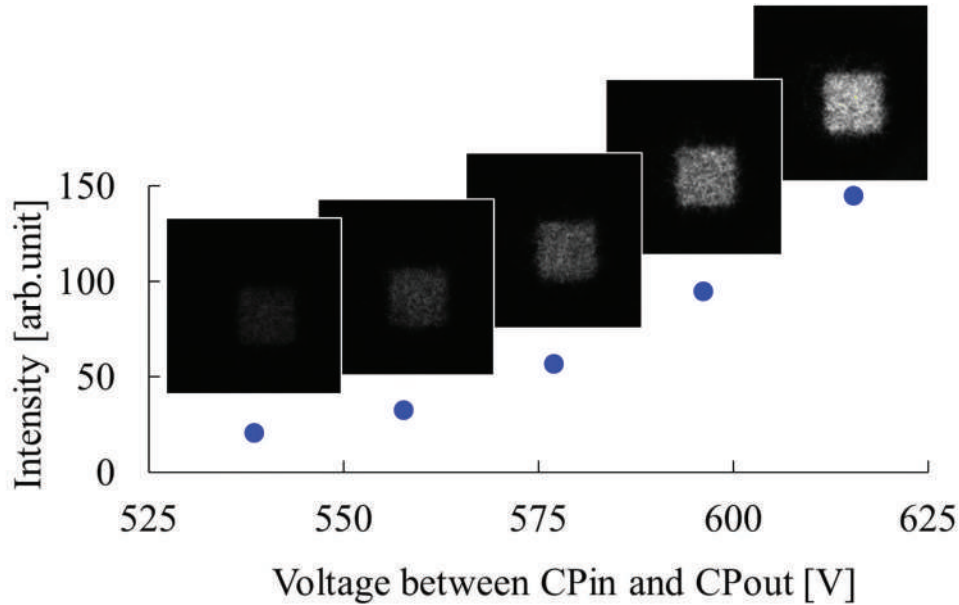


図3.10 CP の上面と下面の間に印加する電圧とシンチレーション強度の関係

中性子は遮蔽されない事より、バックグラウンド信号はGdを透過した高速中性子による信号と考えられる。

得られた中性子信号の線の長さ(図3.8)が1 mm以上であり、空間分解能は1 mm以上であった。

キャピラリープレート電極間印加電圧とシンチレーション強度

電子増幅部としてのCPの動作を検証するために、CPへの印加電圧とシンチレーション強度との関係を調べた。シンチレーション強度はCPの電子増幅度(ゲイン)に依存し、ゲインはCPの上面と下面との間に印加される電圧に依存する。すなわち、シンチレーション強度は印加電圧が高くなるほど大きくなる(2.2.2参照)。図3.10には印加電圧と中性子像の関連を示す。いずれの画像もB₄Cゴム開口部の像であり、積算時間は180秒である。撮影した画像に対し中性子を照射していないときの画像を減算するバックグラウンド減算処理加工を行って得た。横軸はCP上下面間の印加電圧を示し、縦軸はシンチレーション強度を示す。プロットされた点は、各画像のシンチレーション強度の平均値であり、印加電圧の変化に伴うシンチレーション強度の変化を示している。シンチレーション強度は予想通り増加した。n-CPGDにおいて検出器の印加電圧の操作により画像の輝度を調整できることが示された。

3.3 検出器の高空間分解能化

3.3.1 シミュレーションを利用した空間分解能向上の検討

X線CPGDによるイメージングでは、X線によりCPの穴の入口付近で発生した電子だけが増幅されることで、穴径に近い空間分解能が得られていた(2.2.2参照)。しかし、開発した中性子検出器では、一つの中性子入力(シングルイベント)に対し複数の穴が同時に発光していた。これは荷電粒子の飛跡像と考えられる。コンバーターとCPの間には厚さ300 μm の隙間があり、キャピラリー内と同様にガスで満たされている。この領域を荷電粒子が通過すると飛跡に沿って電子が発生し、それがガス電子増幅されたと考えられる。この検出器では中性子二次元像を得るためにはコンバーター表面上で中性子が入射した位置を精密に知る必要がある。しかし、中性子シングルイベントで複数の穴が発光すると入射位置を特定することは困難である。線状の軌跡の始点と終点を特定することが出来れば入射位置を特定することが可能となるが、信号の形状を見る限りそれは容易ではない。また、始点が特定できたとしても処理が煩雑となることが容易に想像される。中性子の入射位置特定の精度を上げるには中性子入射位置とキャピラリーを1対1対応させることが肝要であり、電離電子の生成領域をキャピラリーの穴径以下に小さくする必要がある。

電離電子は荷電粒子の飛跡に沿って生成される。そのため、中性子コンバーターとCPの間の距離を狭めてコンバーターから見たキャピラリーの立体角を拡大し、荷電粒子が中性子入射位置直下のキャピラリーへ入射する確率を高めることで、電離電子の生成領域を単一キャピラリー内に制限できると考えた。そこで、コンバーターとCPの距離(ギャップ)を可変として、粒子と重イオン輸送コードシステムのシミュレーションコード(PHITS)[49]を用いて荷電粒子の飛跡のシミュレーション検討を行った。計算に使用したジオメトリーを図3.11に示す。ギャップ以外の条件は3.1節の開発品と同じとした。使用した条件は次のとおりであった。中性子コンバーター ^{10}B 膜厚は3 μm 、ガス領域のガスはNe(90%)+CF₄(10%) 1気圧、入射中性子線の形状、位置、エネルギー、数はそれぞれペンシル、中央、25 meV、500個とした。ギャップは可変とした。電離電子は荷電粒子がガスとの相互作用によりエネルギーを損失することで生成されるため、荷電粒子(α 線または $^7\text{Li}^+$)のエネルギー損失位置を電離電子の生成位置と考えることができる。このシミュレーションでは、 α 線のガス中でのエネルギー損失の位置を求めた。ギャップを1.5 cmとしたときのシミュレーションの結果を図3.12に示す。図3.12は図3.11のジオメトリーと同じ方向から見ている(xz面)。横軸

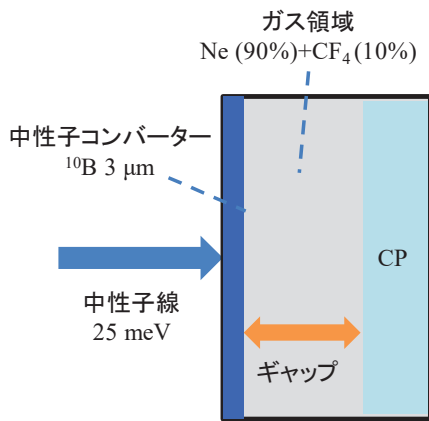


図3.11 解析用ジオメトリー

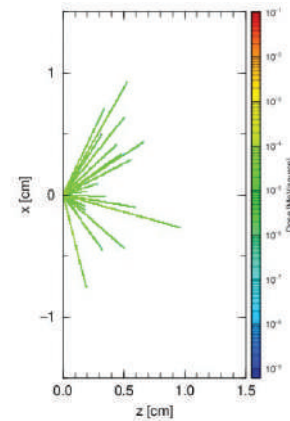


図3.12 ギャップ1.5 cmとしたときの
 α 線のガス中エネルギー損失(xz面)

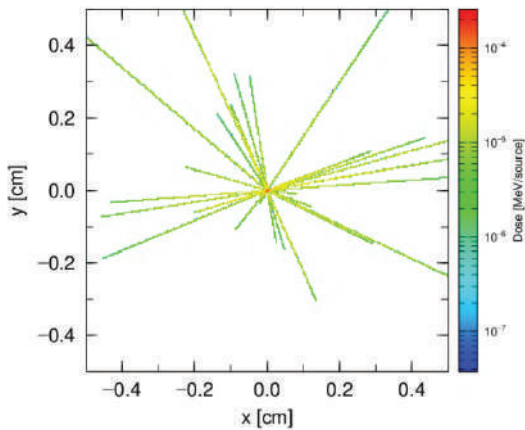


図3.13 ギャップ=1.5 cmとしたときの
のガス中エネルギー損失(xy面)

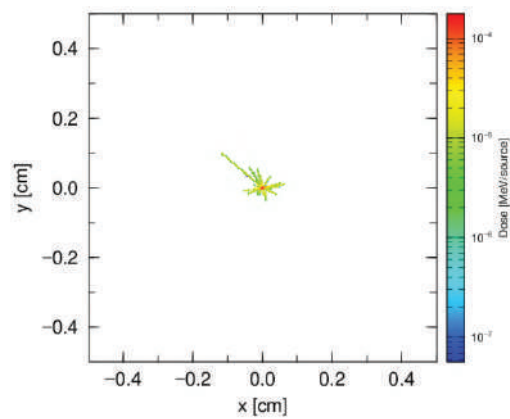


図3.14 ギャップ=300 μ mとしたときの
 α 線のガス中エネルギー損失(xy面)

は z 方向で 0.0 cm の位置に中性子コンバーター、0.0003 cm ~ 1.5 cm がガス領域である。縦軸は x 方向で原点の位置に中性子を入射した。中性子入射位置であるコンバーターの中央部からガス中に向けて線が放射状に伸びている。これは、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応で発生した α 線がガス中でエネルギーを損失した位置、すなわち電離電子の発生位置を示している。線の色は損失したエネルギー量を示し、図中にカラースケールを示してある。荷電粒子が飛び出す方向はランダムであり、その飛程は 1 cm 程度であることがわかる。図3.13は、図3.12と同条件で計算したときの xy 面におけるガス中のエネルギー損失位置である。表示領域は 1 cm \times 1 cm である。中央である x = y = 0 cm の位置に中性子が入射し、そこから放射状に電離電子が発生している事がわかる。つまり、ガス領域が α 線の飛程以上に広い場合、CP 側

から見た電離電子の発生領域は、中性子入射位置を中心とした半径約1 cm の拡がりを持つことになる。

次にギャップを変化させて、電離電子生成領域(= α 線のエネルギー損失位置)の変化をシミュレーションにより調べた。比較は図3.13と同じ xy 面で行った。3.2節で作製した n-CPGD のギャップと同じギャップ= 300 μm の結果を図3.14に示す。ギャップが小さくなることで α 線のエネルギー損失領域は小さくなっている。

本研究で使用している CP の穴径は50 μm であるため、一個の中性子入射で複数の穴が発光しないようにするには荷電粒子のエネルギー損失領域の直径を50 μm 以下にする必要がある。そのようになるギャップの条件をシミュレーションから推定する。入射中性子線数を 10^7 個にし、 α 線のエネルギー損失量の分布を調べた。ギャップを300 μm としたときの xy 面でのシミュレーションの結果を図3.15に示す。中性子入射位置である中央のエネルギー損失量が高くなっている。次にギャップを変化させて、エネルギー損失量の分布の変化を調べた。比較は、xy 面の $y=0$ 位置のラインプロファイルで行った。ギャップを300 μm 、30 μm としたときの結果を図3.16に示す。ギャップが小さくなるとエネルギー損失の拡がりも小さくなっている。ギャップが300 μm では、直径50 μm (赤線で挟まれた領域) の外側でもエネルギー損失が見られるが、ギャップが30 μm では、直径50 μm の領域内で約90%のエネルギーを損失することが分かった。すなわち、ギャップが30 μm のときには、発光を単一の穴にほぼ限定可能であると考えられる。

3.3.2 検出器の改良

コンバーターと CP との間の距離(ギャップ)は中性子シングルイベントによる電離電子の生成領域に関係することが分かった。ギャップ有無の動作の比較をした原理図を図3.17に示す。図3.17a は、3.2節の開発品の構造模式図であり、300 μm のギャップがある。この構造では、中性子シングルイベントにより生成された荷電粒子は、コンバーターと CP の間のギャップをほぼ水平の方向にも飛び、その飛跡に沿って電離電子が生成される。それらは CP 上面に導かれ、複数の穴に入射する。穴の中に導かれた電離電子はガス電子増幅され、同時にシンチレーション光を発生する。

図3.17b は、ギャップを無くした構造である。この構造では、コンバーターが穴を塞ぐように CP 上面に取り付けられており、ほぼ水平方向に飛び出した荷電粒子も、CP の穴に入射した後、CP の壁に入射し止まる。ガラス壁の厚さは最薄部でも14 μm である。一方、

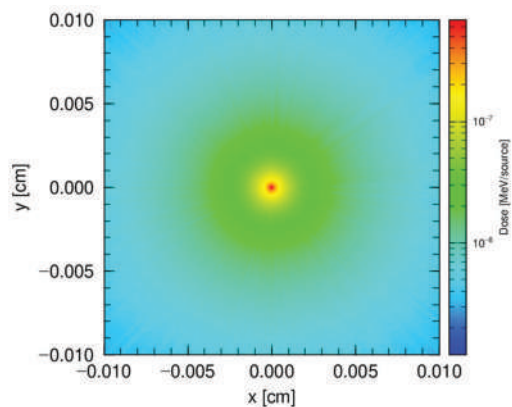


図3.15 ギャップ=300 μm としたときの α 線のガス中エネルギー損失(xy 面)

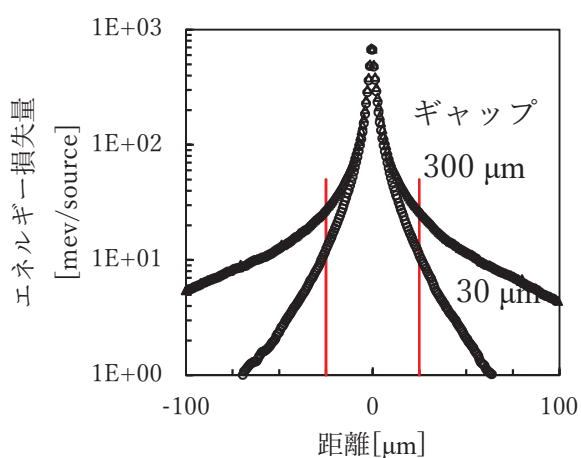


図3.16 ギャップ=300 μm , 30 μm としたときの α 線のエネルギー損失量の分布
(xy 面の $y = 0$ のラインプロファイル)

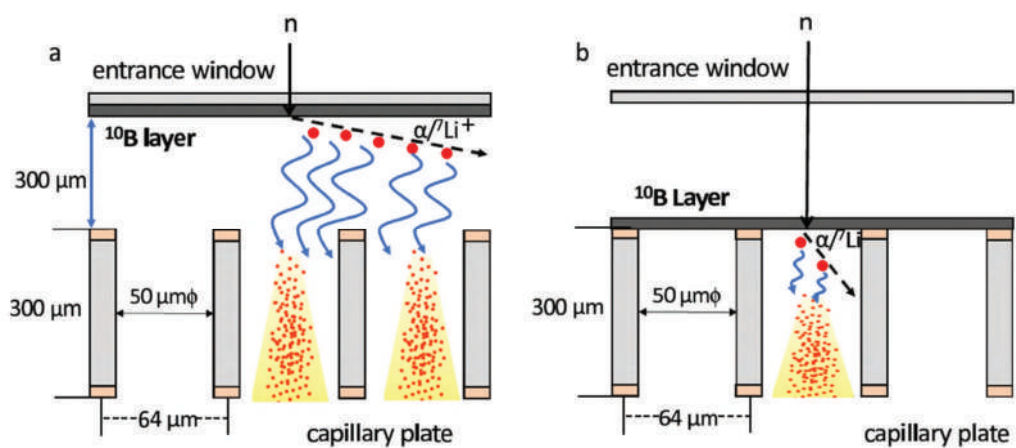


図3.17 n-CPGD の原理図 コンバーターと CP のギャップ有無の比較

(a)ギャップあり(300 μm)、(b)ギャップなし

α 粒子のガラス内での飛程は約 $5\ \mu\text{m}$ である。したがって、電離電子は一つの穴の中に限られ、隣接する穴では電離電子は生成されない。つまり、ギャップがない場合には、中性子シングルイベントにより一つの穴のみでシンチレーション光が生じ、空間分解能は穴の間隔 ($64\ \mu\text{m}$) に近い値になると考えられる。

ギャップを無くした構造の荷電粒子閉じ込め効果を検証するため、PHITS を用いたシミュレーションを行った。シミュレーションで使用した条件は次のとおりである。コンバーターの材料は ^{10}B とし、その厚さは、3.2節と同様に熱中性子に対してガス領域への荷電粒子の放出確率が最大 (約6%) となるように $3\ \mu\text{m}$ とした。コンバーターは CP 上面の穴を塞ぐように設置した。CP の穴径、穴間隔、CP 厚さは、それぞれ $50\ \mu\text{m}$ 、 $64\ \mu\text{m}$ 、 $300\ \mu\text{m}$ であり、図3.17b と同じとした。CP の材質はガラス、CP の穴の内部は $\text{Ne}(90\%)+\text{CF}_4(10\%)$ 、1気圧の混合ガスとした。中性子の入射エネルギーは $25\ \text{meV}$ 、中性子ビームの形状はペンシル、入射位置は穴の中心軸上、入射した中性子数は $10^7\ \text{n/cm}^2/\text{s}$ とした。

図3.18は、コンバーターと CP にギャップがない構造の n-CPGD における α 線の飛跡のシミュレーション結果を示す。 α 線の分布は色で示されている。図3.18a は中性子入射方向の横方向から見た結果であり、図3.17b と同じ方向である。横軸方向に9本の穴が並び、中性子は上方向から $x=0$ の位置に入射している。コンバーター上の中性子が入射した位置で α 線が発生している。中央の1本の穴だけで飛跡が認められ、他の8本にはほぼ飛跡がない。図3.18b は中性子入射方向から見た結果である。円は穴の縁を示し、円の内側はガス領域でそれ以外の領域はガラスである。中性子を入射した $x = y = 0$ の穴(円)の内側とその円の周辺に着色がある。中央以外の穴には着色がない。円の周辺に着色があるのは α 線が穴の周囲のガラス内で止まっていることを示している。これらのことから、ギャップがない構造では α 線は中性子入射位置の直下の穴に制限されており、電離電子も一つの穴だけに制限できていると考えられる。

CPとコンバーターの平面度

以上の検討を元にギャップ無し構造の n-CPGD の開発を行った。CP にコンバーターを直接成膜することはできないため、コンバーターをシリコン基板に成膜し、それを CP 上面に載せる構成とした。この構造を実現するにはコンバーターと CP の表面がいずれも十分に平坦である必要があるが、現実には製作上の都合により数 μm 程度の凹凸が生じることは避けられず、ギャップが生じてしまう。前節の検討ではギャップを $30\ \mu\text{m}$ 以下にすれ

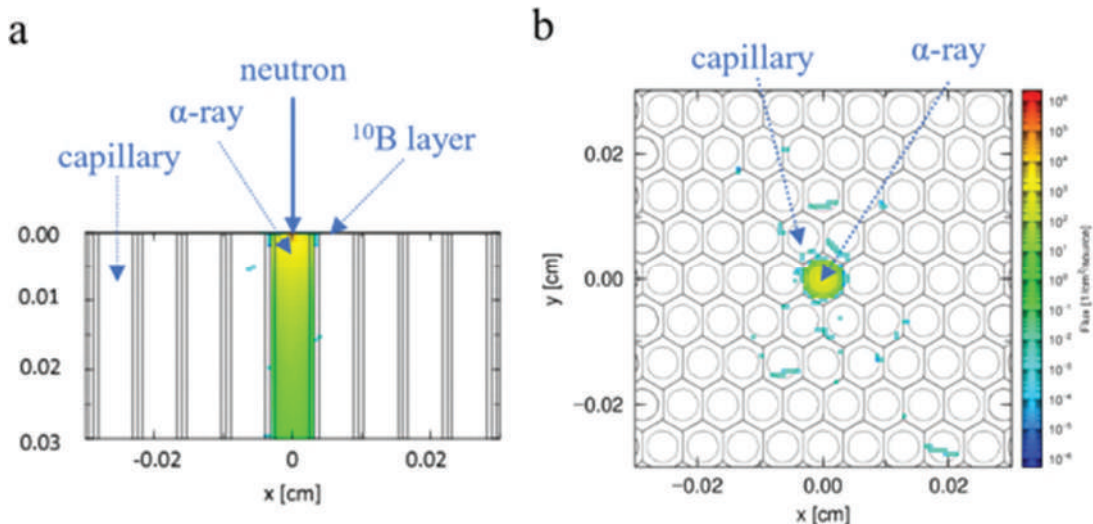


図3.18 n-CPGD ギャップ無し構造の α 線の飛跡シミュレーション

(a)中性子入射の横方向から見た結果 (b)中性子入射方向から見た結果

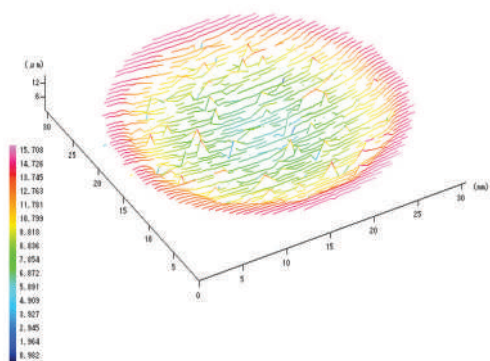


図3.19 CP平面度 8 μ m

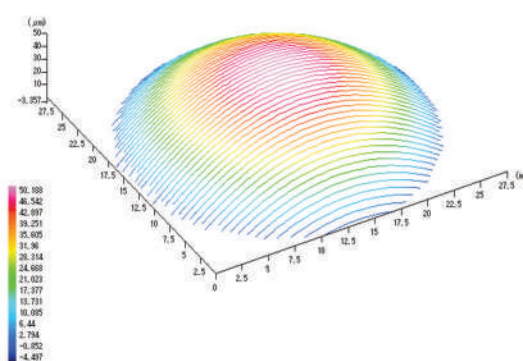


図3.20 シリコン基板(厚さ0.38mm)上の
コンバーター(¹⁰B₄C)平面度 50 μ m

ば発光を単一キャピラリーに制限可能である。コンバーターと CP の平面度の測定結果を図3.19,20に示す。平面度測定は三鷹光器製非接触三次元形状測定装置 NH-3N を利用した。CP 表面の平面度は $8 \pm 2 \mu\text{m}$ であり、中央が凹であった(図3.19)。一方、コンバーターは使用する基板の厚みで平面度が異なった。厚みの異なるシリコン基板上に¹⁰B₄Cを $2 \mu\text{m}$ [51,52]成膜しコンバーターとした。コンバーターの外径は CP と同じ $\phi 33 \text{ mm}$ とした。シリコン基板の厚さを 0.38 mm 、 0.6 mm としたときの平面度は、それぞれ $50 \mu\text{m}$ (図3.20)、 $20 \mu\text{m}$ であった。形状は CP に接触させる¹⁰B₄C面の中央が凸の形状であった。このように、コンバ

ーターは中央が下向きに凸であり、CPは中央が凹であるのでコンバーターをCPに搭載すると、中央で接触し、外縁部にギャップが生じることになる。コンバーターの平面度 $50\ \mu\text{m}$ 、 $20\ \mu\text{m}$ に対して外側の最大ギャップはそれぞれ約 $50\ \mu\text{m}$ 、約 $20\ \mu\text{m}$ 以下となる。厚さ $0.6\ \text{mm}$ のシリコン基板上に成膜されたコンバーターを用いればギャップを $30\ \mu\text{m}$ 以下にする構造を実現できると考えられる。

そこで、 $0.6\ \text{mm}$ 厚シリコン基板に $2\ \mu\text{m}$ の $^{10}\text{B}_4$ を成膜したコンバーターによる中性子ガス電子増幅検出器(n-CPGD)を開発し、これと光学読み出し系を組み合わせた改良型n-GSIを構築した(図3.21)。

3.3.3 改良型検出器の中性子照射実験

京都大学原子炉(KUR)のビームライン CN-3[53]で中性子イメージングの性能試験を行った。このビームラインはスーパーミラーガイドチューブを装備し、中性子の有効エネルギー範囲は $5\ \text{meV}$ から $36\ \text{meV}$ 、ピークは約 $20\ \text{meV}$ 、ビームサイズは $2\ \text{cm}\times 9\ \text{cm}$ 、中性子フラックスは $7.6\times 10^5\ \text{n/cm}^2/\text{s}$ ($1\ \text{MW}$ 運転)、 $3.8\times 10^6\ \text{n/cm}^2/\text{s}$ ($5\ \text{MW}$ 運転)、線源の拡がりを示すL/Dは100である[53]。ここでDは中性子コリメーターのサイズでLはコリメーターから検出器までの距離である。改良型n-GSIは、ビームラインの出口から $30\ \text{cm}$ 下流に配置した(図3.21b、図3.22)。また、コンバーターとCPとのギャップが $300\ \mu\text{m}$ の改良前n-CPGD(3.2参照)も比較のためにテストした。

n-GSIの模式図を図3.21aに示す。n-GSIは、n-CPGD、ミラー、カメラレンズ(ペンタックス SMC PENTAX-FA645 75 mmF2.8+ ニコン Micro-Nikkor 105 mm f/2.8)、I.I.ユニット(浜松ホトニクス C9016-02+A4539)、s-CMOSカメラ(浜松ホトニクス C13440-20CU)で構成した。C13440-20CUによる画像取得には、露光時間変更、画像積算が可能な画像取得ソフトウェア U8913-01(浜松ホトニクス製)を用いた。光学系の像倍率は1.4倍であり、これとs-CMOSカメラの画素サイズ $6.5\ \mu\text{m}\times 6.5\ \mu\text{m}$ 、画素数 $2048\ \text{pixel}\times 2048\ \text{pixel}$ から、サンプル上のイメージングエリアは $9.7\ \text{mm}\times 9.7\ \text{mm}$ になる。I.I.ユニットの光増強度は約 10^3 倍であった。カメラレンズのF値、倍率、I.I.ユニットの光増強度、カメラの量子効率等を考慮して計算すると、n-CPGDのキャピラリー1本あたり約700個の光子が発生すると輝度100階調程度の輝点として取得されることになる。

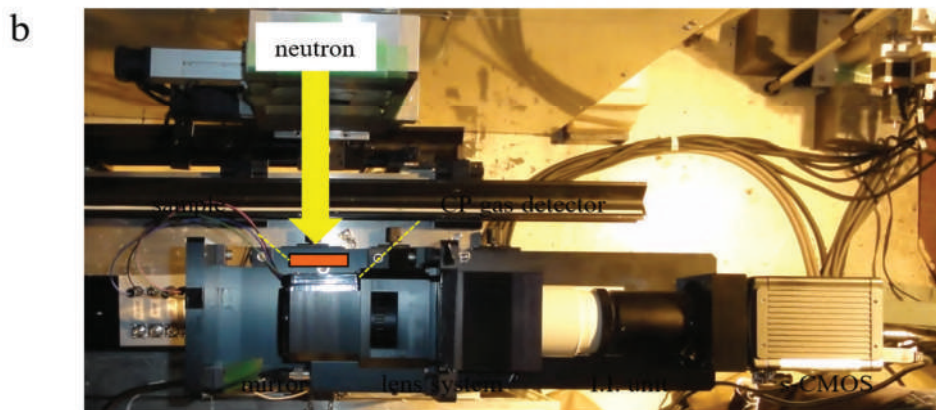
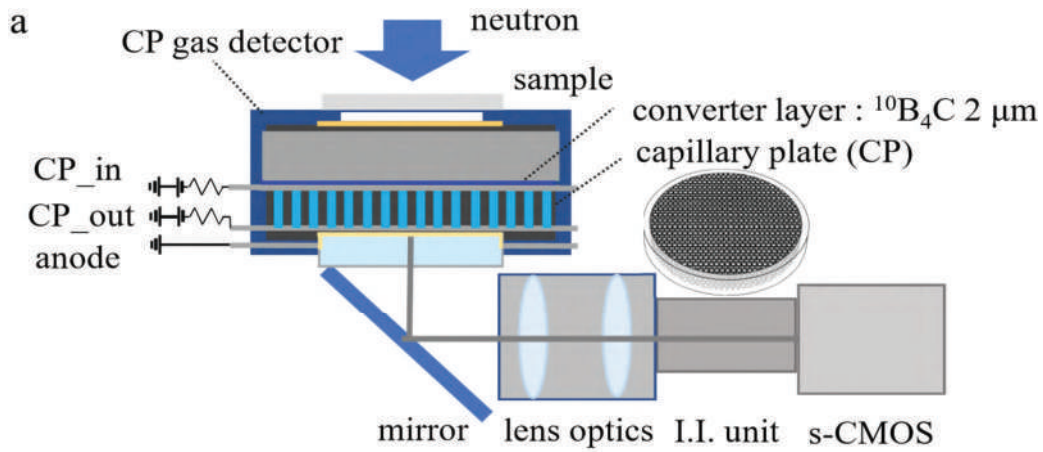


図3.21 (a) $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 層を用いNe(90 %)+CF₄(10 %)、1気圧で満たされたCPGDと光イメージングシステムを組み合わせたn-GSIの特性評価実験の概略図 (b)KURのビームラインCN-3での実験セットアップの写真。

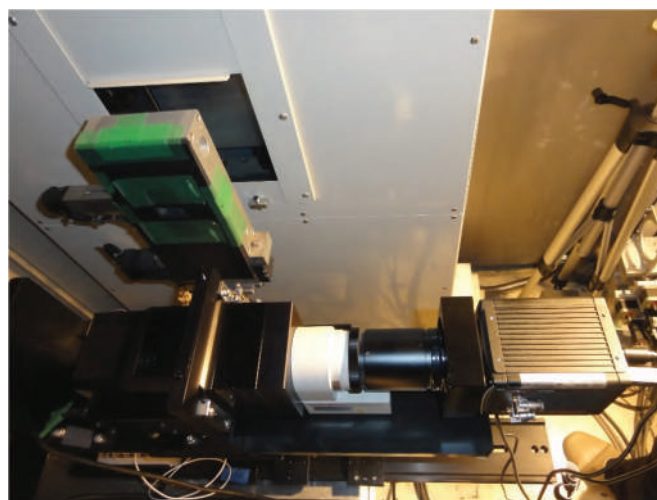


図3.22 KURビームポートCN-3実験セットアップ

3.3.4 改良型検出器の実験結果と考察

中性子シングルイベントで得られる中性子像

図3.23に n-CPGD のギャップ有りタイプとコンバーター直接マウントタイプで得られた中性子像の比較を示す。サンプルは図3.23中央に示す「イ」の字型の開口部を持つ Gd 板を用いた。図3.23a、b の黄色点線枠はサンプルの開口位置に相当する。サンプルはコンバーターから8.6 mm の位置に設置し、露光時間は5 ms とした。これらの画像は、中性子を照射していないときに撮影した画像によるバックグラウンド減算処理を行っている。ギャップ有りの改良前 n-CPGD で得られた画像(図3.23a)には、さまざまな長さの荷電粒子の飛跡像が確認された。中性子シングルイベントで発生した飛跡像には開口領域の外側まで伸びているものもある。一方、コンバーターを直接マウントした改良型 n-CPGD で得られた画像(図3.23b)には、図3.23a のような飛跡像は見られず、開口部領域内に輝点を確認されたのみである。図3.23c 及び3.23d は、それぞれ図3.23a 及び3.23b のマークされた領域の拡大画像を示す。改良前 n-CPGD で得られた飛跡像(図3.23c)は連続した複数の輝点で構成されている。一方、改良型 n-CPGD で得られた像は一つの点状であった(図3.23d)。図3.23d の一つの輝点のラインプロファイルを図3.24に示す。横軸はサンプル上の長さであり、縦軸は輝点の強度を示す。青点で示したラインプロファイル計測点はピークを中心として左右対称に分布し、ガウス関数でフィッティング(赤線)して得られた半値全幅(FWHM)は39 μm であった。これは CP の穴径50 μm より小さい。したがって、一つの輝点を構成する信号(シンチレーション光)は一つの穴で発生していると考えられる。

図3.23b における輝点の数(約10個)、Gd 板の開口面積(8.7 mm^2)、露光時間(5 ms)、及び中性子量($7.6 \times 10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$)を考慮すると、この実験での中性子検出効率は約2%と推定される。一方、コンバーター($^{10}\text{B}_4\text{C}$: 2 μm)からガス領域へ荷電粒子の放出確率は約5%であり、CP の開口率は約60%であるから、一個の荷電粒子が一つの穴だけで電離電子を生成している場合の理論上の検出効率は約3%であり、実験で得られた値はこれとよく一致する。輝点のプロファイルの FWHM が CP の穴径よりも小さいこと、および、一個の中性子が一つの穴だけで電離電子が生成された場合の理論的検出効率と実験の検出効率が近い値であることから、コンバーターを直接マウントした改良型 n-CPGD では、一つの中性子入射に対し一つのキャピラリーのみでシンチレーション光を発生させることに成功したと考えられる。

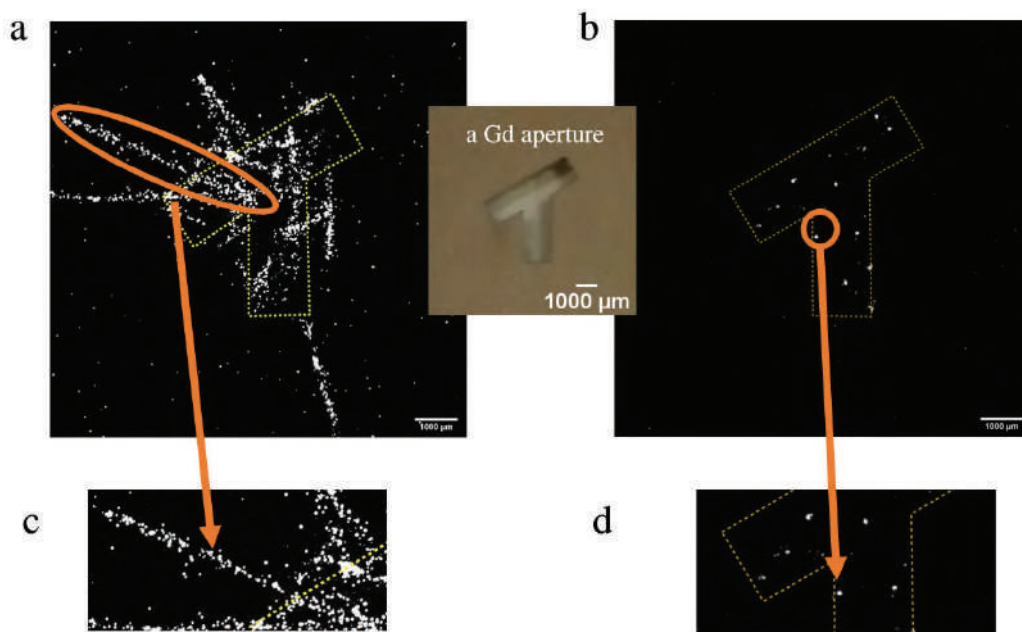


図3.23 n-CPGD改良前後の中性子像の比較：(a)改良前ギャップ有りn-CPGDによる中性子像、(b)改良後ギャップ無しn-CPGDによる中性子像、(中央)撮影に用いた「イ」の字型開口部を有するGd板、(c) および (d)はそれぞれ (a) と (b) でマークした楕円形の領域付近を拡大した画像。

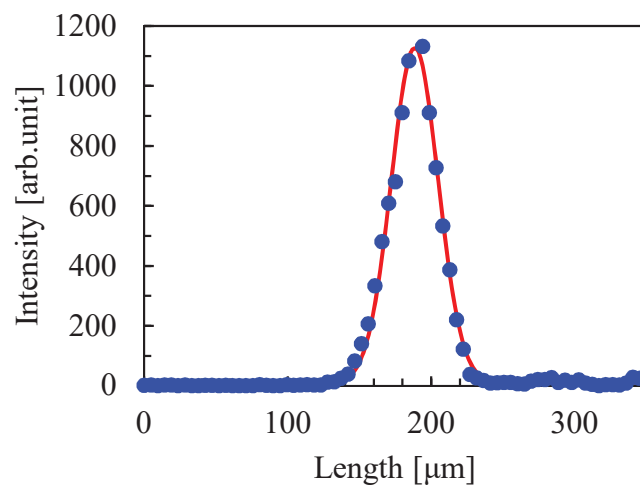


図3.24 図3.23dの一つの輝点について求めたラインプロファイル 青点:測定点、赤線:ガウス関数フィッティング

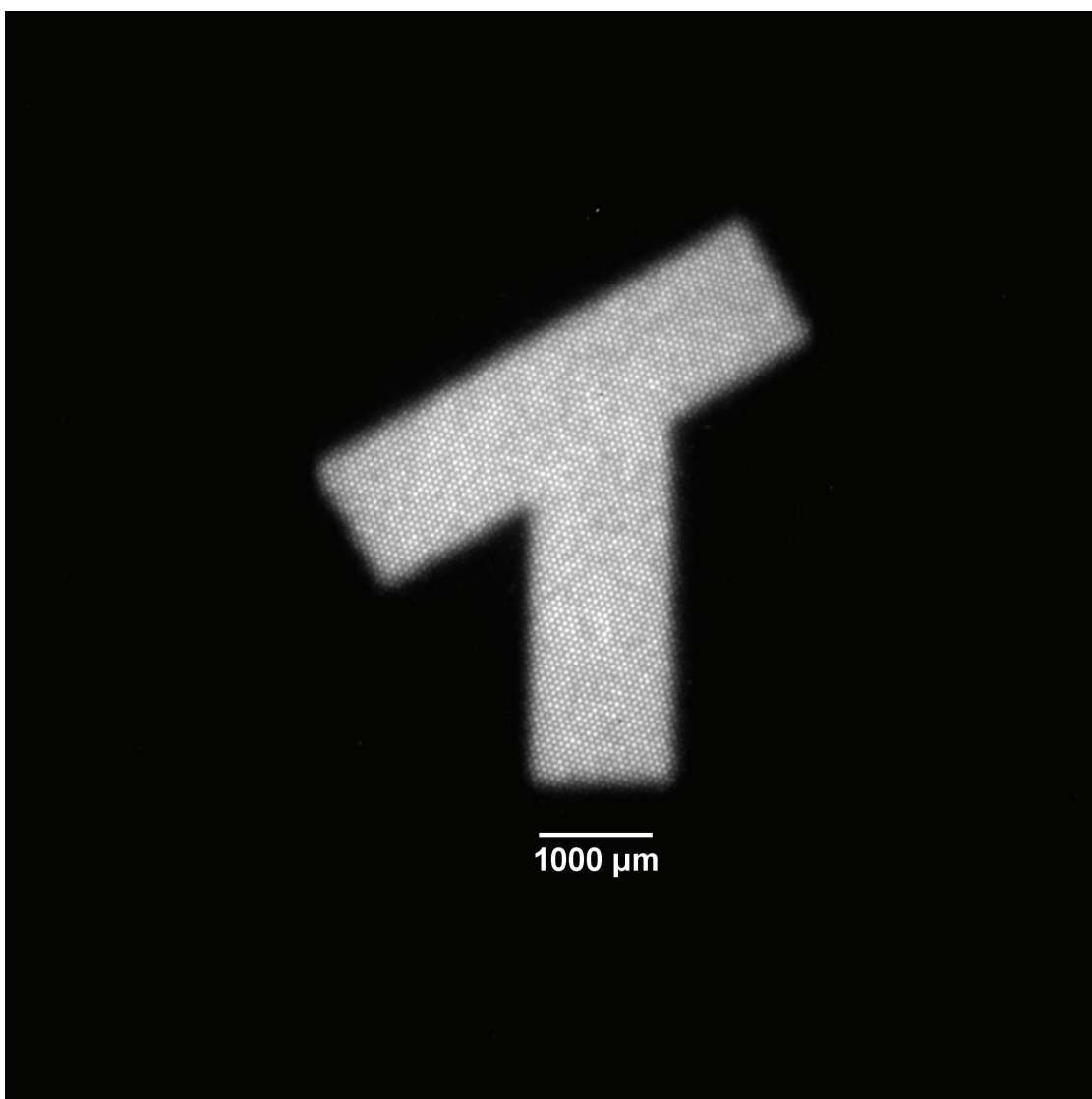


図3.25 改良型n-CPGDによる中性子像(積算時間 : 10 min)

積算による中性子イメージング

次に、改良型 n-CPGD を用いた「イ」の字型開口の中性子像の取得を行った。10 min 間の積算にて得られた中性子像(バックグラウンド減算処理後)を図3.25に示す。このように Gd 板開口部形状と同じ「イ」の字が明瞭に確認できた。「イ」の内側に小さな円が整列した構造が確認できる。この円のサイズと配置は CP の構造と一致し CP の穴の像が確認できていると考えられる。

空間分解能評価

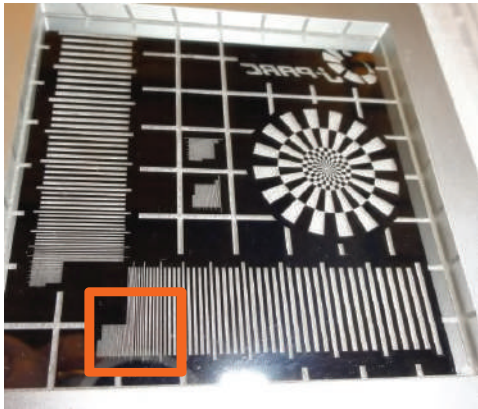
次に、改良型 n-CPGD の空間分解能の評価を行った。空間分解能評価には、①解像度チャートによる方法や②変調伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF)を測定する方法が一般に用いられている[54]。まず、解像度チャートによる評価を行った。この方法では、線幅と線間隔が段階的に変化するラインペアを有する解像度チャートの撮像を行い、得られた画像のプロファイルから2つの隣り合う線を分解可能であるかの判定を行う。2つの近接した像点を2つであると区別できる限界の基準に半値幅やレイリーの解像限界がある。2つのガウス分布をもった像点がそれらの限界基準より離れていれば、2つの像点の間には極小点（鞍点）が見られる。しかし、限界基準より近接すると極小点がなくなり2つの像を区別することができない。すなわち、2つの像点を2つであると区別するには2つの像間に極小点があることが重要である。空間分解能はラインペアの極小点を確認できる最小ラインペアにて評価する。中性子線専用の解像度チャートを図3.26a に示す[20]。大きさ90 mm×90 mm、厚さ1 mm のガラスシート上に厚さ3 μm の Gd 金属層が蒸着されており、0.01 mm から1 mm まで線幅の異なるラインペアが形成されている。各線幅のラインペア数は5本ある。

図3.26b は積算時間300 s の解像度チャート像である。解像度チャートはコンバーターから8.6 mm 離れた位置に設置した。入射中性子線強度は 3.8×10^6 n/cm²/s(5 MW 運転)であった。図3.26c は解像度チャートなしで取得した積算時間300 s の参照画像であり、これを用いて正規化補正した画像を図3.26d に示す。正規化補正により中性子線の強度ムラや検出器の持つ感度ムラを取り除くことができる。補正後の画像 I_n は、解像度チャート像を I_s 、参照画像を I_r とすると式(3.1)で表される。

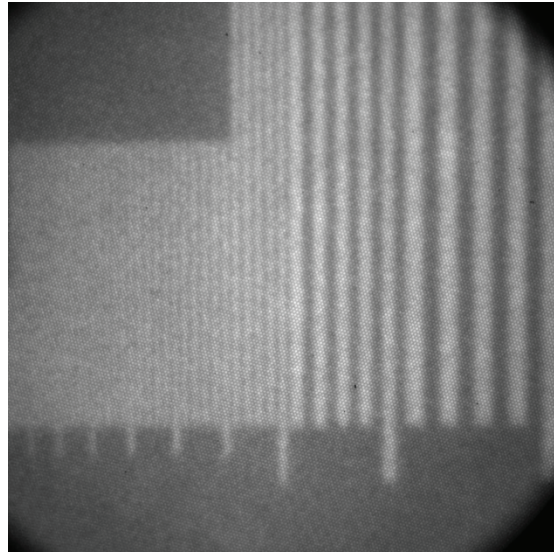
$$I_n = \frac{I_s}{I_r} \quad (3.1)$$

これで得られた解像度チャートの像を利用し、空間分解能の判定を行った。図3.27a (図3.26d 再掲) の横軸の数値は図3.26a のチャートの線幅[20]に対応している。図3.27b の実線と破線のラインプロファイルは、図3.27a の実線(ラインペア部)および破線(スリット部)で囲んだ領域に対応している。

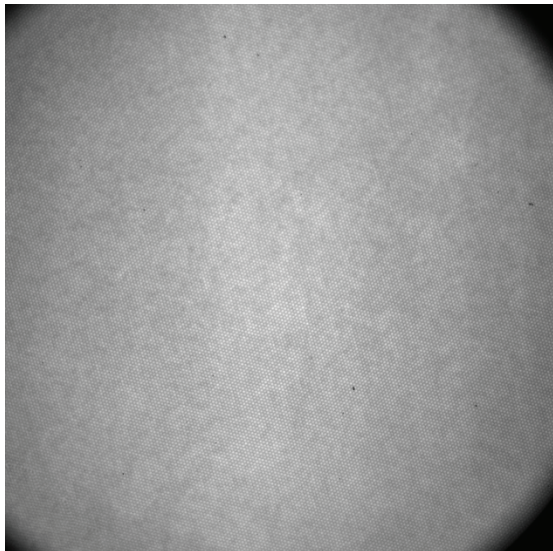
ラインペア部(図3.27b 実線)では、周期性のあるラインプロファイルが得られた。ラインペアの線幅が300 μm、200 μm と周期が長い領域ではピークとバレー(極小点)を明確に確認



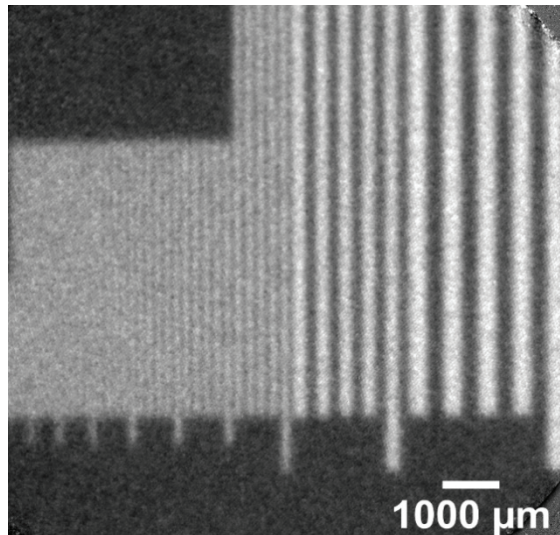
a)Gd 解像度チャートの写真[20]



b)解像度チャート像



c)参照画像(解像度チャートなし)



d)正規化補正画像

(=解像度チャート像/参照画像)

図3.26 Gd 解像度チャートによる改良型検出器の評価

することができ、その数も5本と判別できるが、線幅が $40\ \mu\text{m}$ 、及び $50\ \mu\text{m}$ の周期が短い領域では振幅が小さくなり、ピークとバレーを明確に判別できない。線幅 $80\ \mu\text{m}$ のラインペアでは周期性のある5つの極小点が確認できた(図3.27b 橙色四角)。しかし、線幅 $70\ \mu\text{m}$ のラインペアでは極小点の周期性が崩れていた。したがって、チャートによる空間分解能は $80\ \mu\text{m}$ と評価した。

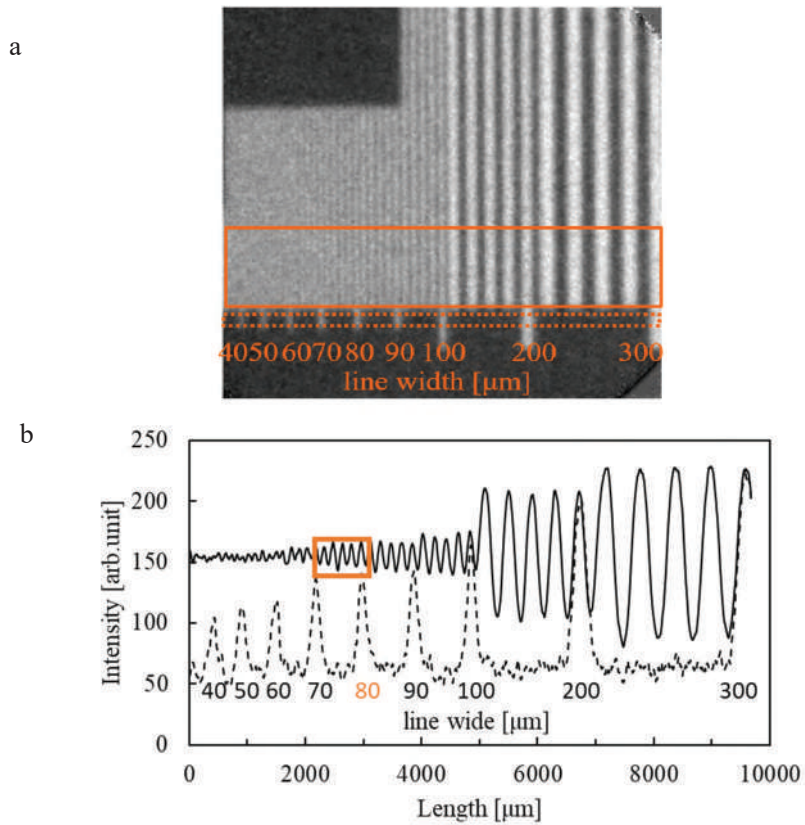


図3.27 (a)コンバーター直接マウントタイプの n-GSI によって得られた Gd 解像度チャートの中性子像(図3.26d の再掲)。(b)実線と破線は、それぞれ図3.27a の実線および破線で囲んだ領域のラインプロファイル。

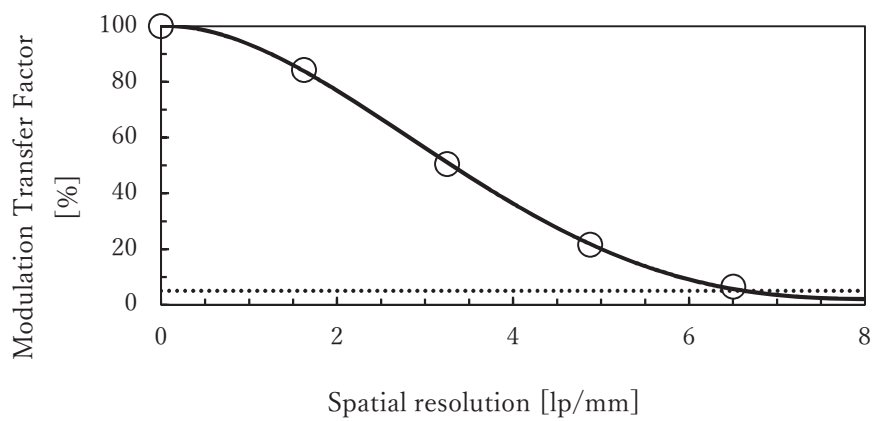


図3.28 エッジ法で求めたMTF(5%)=6.6 lp/mm

次に、Modulation Transfer Function (MTF)で空間分解能の評価を行った。MTFとは被写体の持つコントラストを忠実に再現できる性能を空間周波数特性として表現したものである。これは、点、線、エッジ等を撮影し、そこから得られるPSF(Point Spread Function)やLSF(Line Spread Function)をフーリエ変換することで得られる。エッジを用いる場合は、エッジを撮影して得られたエッジ像を微分してLSFを求めフーリエ変換を行う。フーリエ変換からMTF曲線を作成し、限界解像度を読み取る。一般に限界解像度にはMTF 5%、または10%の値を用いる[36,55]。本研究では、検出器の空間分解能の評価に際して、MTF 5%の値を限界解像度とした。エッジ像として図3.26bを用い、MTFを算出した(図3.28)。点線で示したMTF 5%水準の限界解像度は6.6 lp/mmであったので、空間分解能は $1000 / 6.6 / 2 \approx 76 \mu\text{m}$ と評価した。

線源によるビームの拡がりと空間分解能

中性子イメージングの空間分解能を制限する要因にビームの拡がりがある。ビームに拡がりがあると、サンプルと検出器の位置関係によって得られる像の解像度が変化する。一般的にサンプルと検出器の距離が長いほど解像度は低くなる。そこで、ビームの拡がりによる空間分解能の影響を確かめるため、サンプルと検出器の距離を変化させたときの中性子像の取得実験を行った。用いたサンプルと撮像条件は、図3.25の積算像取得と同じ条件とした。コンバーターとサンプルの距離を8.6 mmから0.5 mm間隔で48.6 mmまで変化させ中性子像を取得した。図3.29から図3.33は、それぞれコンバーターとサンプルの距離を8.6 mm、18.6 mm、28.6 mm、38.6 mm、48.6 mmとしたときの中性子像である。距離が長くなるにつれてサンプルの輪郭がぼやけていくのがわかる。得られた中性子像からエッジ法によりMTFを算出し、空間分解能の変化を調べた。結果を図3.34に示す。横軸をコンバーターとサンプルの距離、縦軸をMTF 5%水準の空間分解能である。コンバーターとサンプルの距離が長くなるにつれて空間分解能が悪くなっている。この距離と空間分解能の間に線形関係を仮定したときの傾きからビームの拡がり角は約3 mradと推測された。これは、KUR CN-3の水平拡がり角3 mrad[53]と一致している。また、距離0での空間分解能を外挿により推測すると68 μm であった。これは、CPの穴間隔64 μm に近い値であり、検出器としてはCP穴間隔による制限の限界に近い性能が実現できていると考えられる。



図3.29 距離 8.6 mmの
中性子像



図3.30 距離 18.6 mmの
中性子像



図3.31 距離 28.6 mmの
中性子像



図3.32 距離 38.6 mmの
中性子像



図3.33 距離 48.6 mmの
中性子像

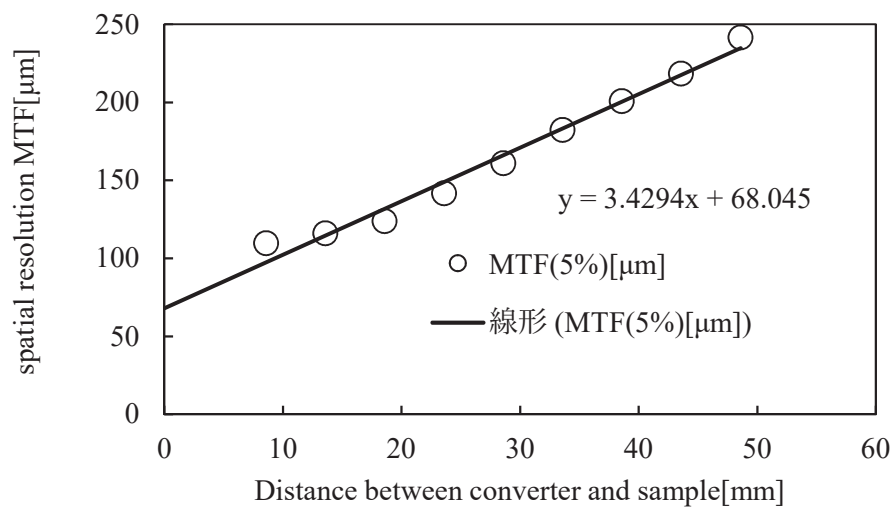


図3.34 コンバーターとサンプルの距離と空間分解能の関係

入射中性子線量と空間分解能

一般に中性子線源の性能は単位面積、単位時間あたりの中性子量($\text{n/cm}^2/\text{s}$)で表現される。使用する中性子線源が決まったとき、入射中性子量は撮像時間に比例する。図3.27の空間分解能は、 $3.8 \times 10^6 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ で5分間、つまり、 $1.1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2$ の入射中性子量により得られた。図3.23のように撮像時間が短すぎると空間分解能を正確に評価することはできない。そこで、入射中性子量と空間分解能の関係を調べた。これにより、使用する中性子線源が決まっているときに、希望する空間分解能に対して必要な撮像時間を推定することが可能となる。

入射中性子量を $3.8 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ (10 s)、 $7.6 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ (20 s)、 $1.1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (30 s)、 $2.3 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (60 s)、 $4.6 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (120 s)、 $6.8 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (180 s)、 $9.1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (240 s)、 $1.1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2$ (300 s)に変化させたときの中性子像を取得し、空間分解能を評価した。実験セットアップは、図3.26と同じ条件とした。図3.35a-図3.38aは、入射中性子量 $3.8 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ (10 s)、 $1.1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (30 s)、 $2.3 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (60 s)、 $6.8 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ (180 s)で得られた中性子像である。図3.35b-図3.38bは、各図aの中性子像の実線で囲んだ領域のラインプロファイルである。入射中性子量が増えるにつれてラインプロファイルのピークとバレーが明確になっていることがわかる。

次に、解像度チャート法により空間分解能の変化を評価した。図3.35bでは、周期性のある極小点が $200 \mu\text{m}$ まで見られた。図の赤線は極小点間から判別できた像点(ガウス分布)であり、赤字はその線幅である。同様に図3.36b-図3.38bの空間分解能は、それぞれ $90 \mu\text{m}$ 、 $90 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ と評価された。入射中性子量と空間分解能の関係を図3.39に示す。図の横軸は入射中性子量であり、縦軸はプロファイルから得られた空間分解能である。入射中性子量 $4 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ 、 $1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ 、 $7 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ のときに得られた空間分解能はそれぞれ $200 \mu\text{m}$ 、 $90 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ であり、入射中性子量が増えると空間分解能は高くなることが確かめられた。

開発した検出器では、入射中性子量約 $7 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ で $80 \mu\text{m}$ の空間分解能を有する中性子透過像が得られた。この中性子量は表1.1より、J-PARCなら約10秒、KUR (5 MW運転時)なら約3分、RANSなら約40時間、KUANSなら約2日の照射で得られる中性子量に相当する。すなわち、n-GSIを用いて $80 \mu\text{m}$ の空間分解能の中性子透過像を得るには、J-PARCなら約10秒、KUR (5 MW運転時)なら約3分、RANSなら約40時間、KUANSなら約2日で得られることが期待できる。同様に、 $200 \mu\text{m}$ の空間分解能の中性子透過像は、J-PARCなら約0.5秒、KUR (5 MW運転時)なら約10秒、RANSなら約2時間、KUANSなら約20時間で得られるこ

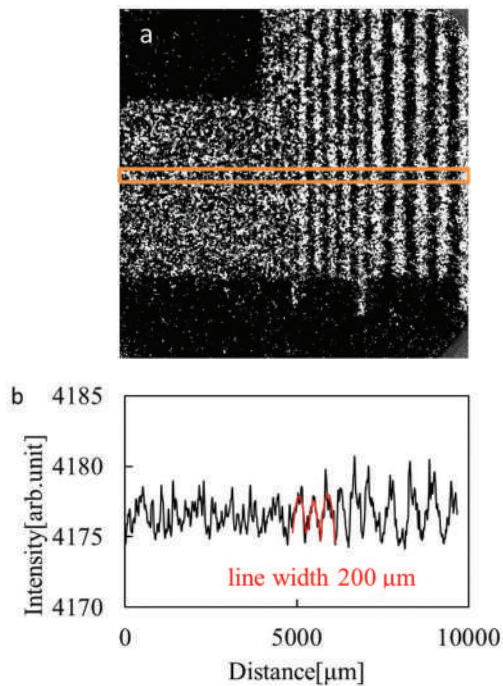


図3.35 a 入射中性子量 $3.8 \times 10^7 \text{ n/cm}^2$ の中性子像、b 図3.35aの実線で囲んだ領域のプロファイル

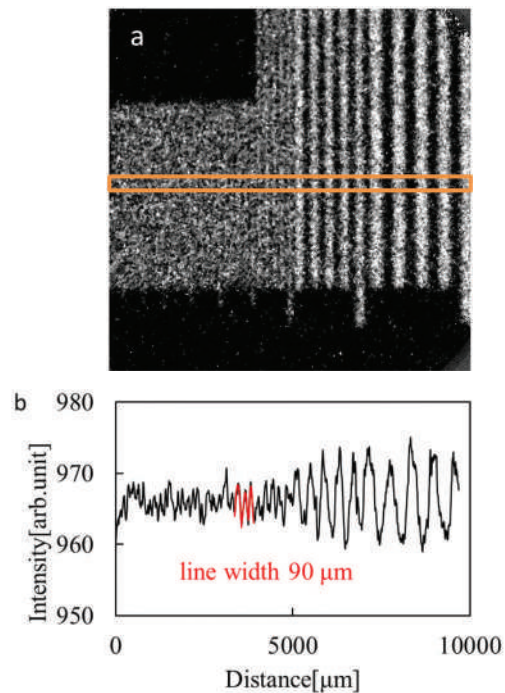


図3.36 a 入射中性子量 $1.1 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ の中性子像、b 図3.36aの実線で囲んだ領域のプロファイル

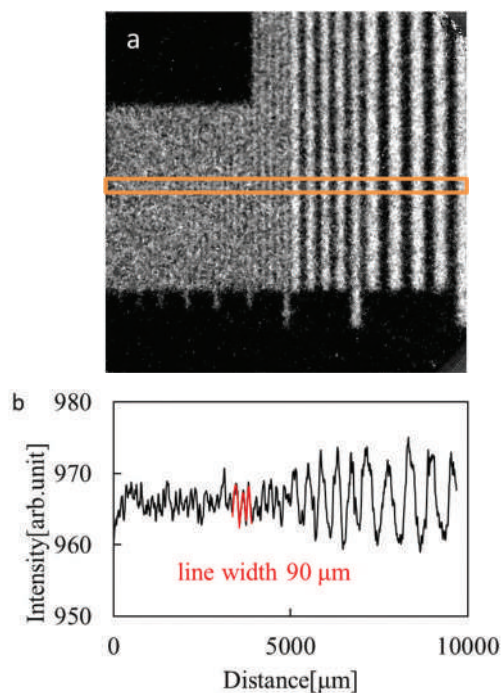


図3.37 a 入射中性子量 $2.3 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ の中性子像、b 図3.37aの実線で囲んだ領域のプロファイル

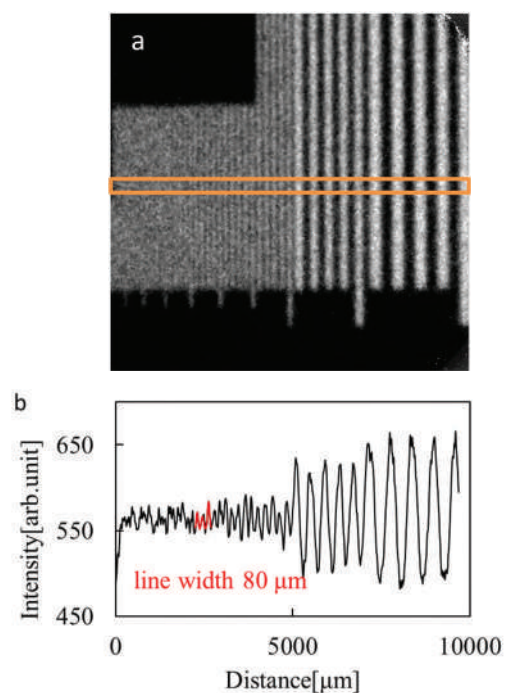


図3.38 a 入射中性子量 $6.8 \times 10^8 \text{ n/cm}^2$ の中性子像、b 図3.38aの実線で囲んだ領域のプロファイル

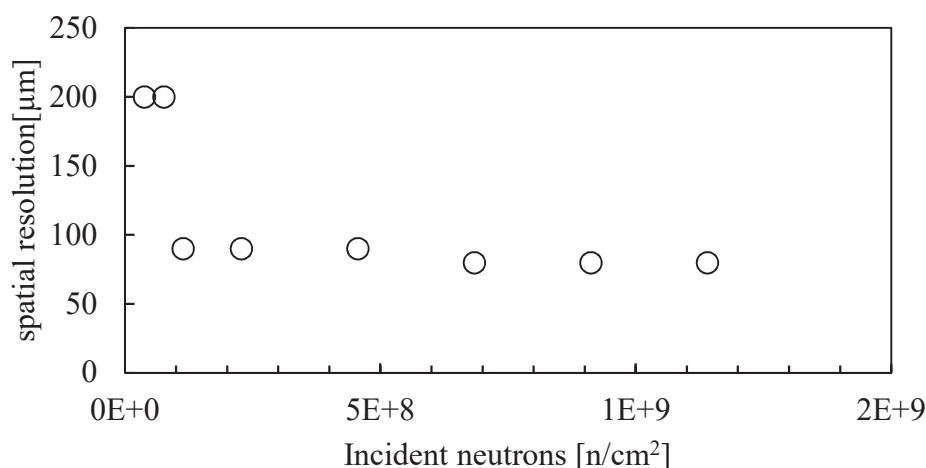


図3.39 入射中性子量と空間分解能の関係

とが期待できる。これらの値は使用する中性子線源と必要な空間分解能が決まったときに必要な撮像時間を決定する際に目安とすることができる。

実用的なサンプル(M8ボルトとナットの噛み合わせ)の中性子透過像

n-GSIを用いてM8ボルトとナットの噛み合わせ部(図3.40a)の中性子透過像の取得を行った。画像の取得は図3.26と同じく、中性子透過像、参照画像を取得し、正規化補正(シェーディング補正)を行った。図3.40bは補正後の画像である。ボルトやナットは金属であるため、X線が透過しにくい。そのため、ボルトやナットのX線透過像を撮像すると輪郭の像になる。これに対し中性子は金属の透過力が高いため、金属の内部を可視化できる。図3.40bのナットにボルトが入っている部分を見ると、ナットの像の中にボルトとナットの噛み合わせ部の様子が観察可能であった。これは建造物などに用いられるネジの非破壊検査に応用できることを示している。

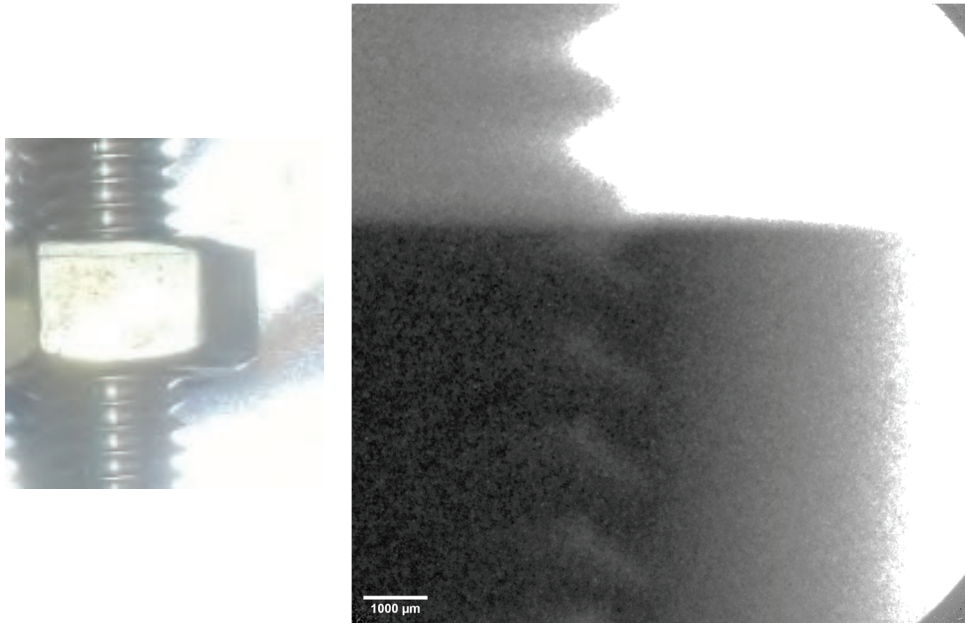


図3.40 a)M8ボルトとナット b)M8ボルトとナットの噛み合わせ部中性子透過像

3.4 空間分解能のさらなる向上のための方策

CPの穴径・穴間隔がそれぞれ $50\ \mu\text{m}$ ・ $64\ \mu\text{m}$ のコンバーター直接マウントタイプn-CPGDを用いて、 $76\ \mu\text{m}$ の空間分解能が得られることを確認した。n-CPGDで更に空間分解能を高める方策を検討する。

空間分解能にとって重要な要素には、CPの穴径・穴間隔、コンバーターとCPのギャップ、光学系の増倍率、線源によるビームの拡がりなどがあつた。空間分解能を上げるには、CPの穴径・穴間隔をより小さく、コンバーターとCPのギャップをより狭く、光学系の倍率はより高く、コンバーターとサンプルをより近くする必要がある。

CPの実際的限界は、キャピラリーの荷電粒子閉じ込め能に律則される。荷電粒子が隣接する穴に抜けず、壁内に留まる限界は壁厚が荷電粒子のガラス内での飛程 $5\ \mu\text{m}$ 以上あればよい。このときの穴径は $17\ \mu\text{m}$ であり、穴間隔は $22\ \mu\text{m}$ あつた(3.1.3参照)。したがって、n-CPGDの限界空間分解能は $22\ \mu\text{m}$ が期待できる。ただし、そのためには、コンバーターとCPの平面度が同程度になるようにし、ギャップを極限まで低減する必要がある。この場合の撮像光学系は、CPの $5\ \mu\text{m}$ の壁を判別できる必要があるため、少なくとも $5\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ の空間分解能が必要となる。例えば、 $5\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ で画素数 $2048\ \text{pixel} \times 2048\ \text{pixel}$ とした場合、視野は約 $10\ \text{mm}^2$ となる。高空間分解能で視野を広げるには、カメラの画素数を増やすなどの対策が

考えられる。また、一般的な中性子線源はビームの拡がりをもつため、高空間分解能な検出器とするためにはサンプルをコンバーターに近づける必要があり、コンバーターと入射面ができるだけ近接した構造にすることが重要である。

n-CPGDにおける実際的限界の空間分解能についての実現性を検討する。CPと同じ手法で作製されるMCPの穴径は4 μm を実現しているため、穴径17 μm のCPは製作可能と考えられる。また、中性子コンバーターは平面度を数 μm 以下にする必要があるが、基板や成膜方法の最適化を行うことで可能と考えている。加えて、サンプルとコンバーター間の距離を極力短くできるよう、コンバーターと入射面の距離などの設計上の工夫を行う必要がある。

さらに、電子増幅部としての特性について、穴径が小さくなることにより穴内でのガス電子増幅度が低下することが懸念され、穴径とガス電子増幅度の関係について知識を深める必要がある。

3.5 第3章まとめ

本章では、熱中性子との反応断面積が大きく、中性子コンバーターとして用いられる ^{10}B と、キャピラリープレートガス電子増幅型検出器を組み合わせた検出器の開発を行った。

- 中性子検出用ガス電子増幅型検出器(n-CPGD)を新規に開発した。

上記検出器と光学系を組み合わせたガスシンチレーション方式中性子イメージング装置(n-GSI)を構築し、中性子線源を用いて中性子透過像の取得に成功した。(査読論文1)

- 空間分解能の向上のため、検出器構造の改良を行った。
- KURで評価実験を行い、明瞭な中性子画像の取得に成功した。このときの空間分解能は76 μm であった。(査読論文2)

また、線源の拡がりや入射中性子線量が空間分解能に与える影響を調べ、開発した検出器の理解を深めた。

さらに、実用的なサンプル(ネジ)の中性子透過像の撮像を行い、開発した検出器の実用的可能性についても示した。

最後に、空間分解能の更なる向上の方策と課題の検討を行った。

第4章 新市場開拓の実践

本章では、開発した検出器の市場投入を目指し、経営理論に基づいて市場の分析をしながら、理論で言われている初期の活動を行った。市場の分析は3C分析を用いて行った。ポーター(1982)の競争戦略論[56]とコトラー(2008)のマーケティング論[57]に基づいた導入期の実践項目を実践した。

4.1 中性子線産業利用における中性子検出器市場の特徴

ここでは、中性子線産業利用における検出器市場について、3C(Customer(市場・顧客)、Competitor(競合)、Company(著者の所属企業H社))分析によりマーケティング環境分析を行う。

4.1.1 Customer(市場・顧客)

中性子検出器の世界市場は、2018年の423 M\$から2023年には1107 M\$と成長が見込まれている[2]。中性子線が軽元素の識別能力をもつことから中性子線ラジオグラフィイーなど非破壊検査のツールとしての利用拡大が期待されている(第1章)。

環境問題などの観点から省電力化、自動車の低燃費化などで二次電池の高度化、鉄鋼材の軽量化などの技術開発が行われている。自動車業界、鉄鋼業界などにおける中性子線を利用した非破壊検査需要が中性子二次元検出器の需要を推進する要因となっている。例として、二次電池内部のLiイオンの分布計測による不良解析、燃料電池の水素貯蔵合金内の水素観察による性能向上、溶接された金属部品の残留応力検査、非金属の接着性評価、樹脂の不良検査、モーターの磁性観察による効率の向上などがある。しかし、中性子線源の数が少ないため、例えばJ-PARCでは産業分野の中性子線源利用は申請者の3割しか利用が認められないなど、ユーザーにとって中性子線は利用しにくい状況となっている(第1章)。

そういった状況を改善するために、国家プロジェクトにてコンパクト中性子線源の技術開発などが進められている[15]。著者が行った2017年2月~10月に行った中性子の専門家に対するアンケート調査(付録)によると、専門家は中性子線源や中性子検出器などのシーズ開発が進むことにより15-20年後には小型中性子線源(コンパクト中性子線源)の数が各地域拠点や企業内で増えてくるとことを予想していた。したがって、中性子線の利用機会を増加させるには中性子線源や中性子検出器などの開発が重要であるといえる。

4.1.2 Competitor(競合)

主な中性子二次元検出器は第1章に示した。このうち製品化されているのは、中性子イメージインテンシファイアー(I.I.)(東芝製)、nGEM(bee beans technologies 社製)、工業用 X 線フィルム+Gd、中性子イメージングプレート(IP)(GE 社製)、ZnS/⁶Li シンチレータ(日本中性子応用光学社製)である。中性子 I.I.、工業 X 専用フィルム+Gd、中性子 IP、ZnS/⁶Li シンチレータは、原子炉など中性子線量が多く、連続で発生する中性子線源でのラジオグラフィに用いられることが多い。そのため、製品価値は中性子に対する感度や面積の大きさが重視された。これに対し nGEM は J-PARC のようなパルスで発生する中性子線源とともに用いられる。そのため、製品価値は時間分解能、計数率、面積の大きさが重要視された。検出器の顧客は中性子線に関連する研究者が多い。nGEM、中性子 I.I.の価格はそれぞれ800万円、7千万円と性能重視の価格設定である。一方、製品とはなっていないがシンチレータ+光検出器、 μ NID など複数タイプの検出器が高空間分解能、高時間分解能を目指し開発が行われていた。

中性子線利用のアプリケーションやニーズが定まっていない状況ではユーザーが購入する検出器は、利用する中性子線源や測定用途に合わせた特注品である場合が多かった。例えば、nGEM では、計数率を上げるためにデータ読み出し部の開発を行ったり、検出効率を上げるためにコンバーターが成膜されている段数を増やしたり、ガス電子増幅の増倍度を増やすために GEM の段数を増やしたりしていた。中性子 I.I.では、高速カメラ、高感度カメラ、レンズ倍率などをユーザーの用途に合わせ提供されていた。

中性子線源の施設数が少なく、その利用目的は研究であることが多い。そのため、中性子二次元検出器の使用は検査用途のように定常的でない。したがって、中性子線源施設が中性子二次元検出器を購入する頻度は不定期である。各施設は数種類の中性子二次元検出器をもっていたが同じ検出器を複数台持つことは少ない。また、消耗品である工業用 X 線フィルムを除いて、消耗品取引の頻度も不定期である。

4.1.3 Company(著者の所属企業 H 社)の技術開発

H 社の核となる製品に微弱な光を電荷信号として可視化する微弱光検出器がある。近年、光半導体素子や信号処理の高度化により、微弱光検出器は競合製品に置き換わりつつあり、その売上の伸びは横ばいとなっている。すなわち、この製品のライフサイクルは成熟期と捉えることができ、今後大きく成長することは難しい。そこで、企業が長期に渡って持続

的に成長するためには、新製品、新事業を継続的に創造していくことが不可欠である。新製品、新事業の創造の核となり競争優位の源泉となるのは技術であり、長期に競争優位を得るため、5年後、10年後の未来志向の技術開発が重要となる[58]。

市場成長が見込まれる中性子二次元検出器において、著者の所属企業H社の製品である微弱光検出器は中性子検出器の一部として使用されることもある。しかし、他の光検出器への代替脅威があり、新しい市場で競争優位を長期に維持することは難しい。市場を開拓するには、中性子を直接検出する製品開発が重要である。製品開発については第3章で述べた。

4.1.4 中性子検出器市場の特徴まとめ

3C分析の結果、中性子検出器の市場に次のような特徴が見られた。

- 中性子検出器の世界市場は成長すると予測されていた。しかしながら、国内における中性子線産業利用では顧客ニーズに対しシーズが追いついていなかった。
- アプリケーションやニーズが定まっていないため特注品が多く、ユーザーとの対話によりカスタマイズが行われていた。
- 検出器の取引数は少なく、購入頻度も不定期であった。つまり、市場開拓のリスクは大きかった。

以上のことをまとめると国内の中性子検出器市場は成長が見込まれているが、まだ不確定要素が多く、いわゆる一般的な製品ライフサイクルの導入期の段階にあることがわかった。そこで、導入期において行うべき活動について次節で考察する。

4.2 中性子二次元検出器市場の開拓

4.2.1 導入期の市場開拓に関する理論

ポーター(1982)は、業界環境のタイプ別に戦略の分析を行っている。これによると、形が整ったばかりの業界である先端業界構造の特徴として、技術の将来性が定かでなく、戦略も定まっていない、初めての買い手ばかりいる、などがある[56]。そのため企業の側では、どのような製品種類の構成が最終的にベストになるか、製品と市場のポジショニング、マーケティング、などの方法を用いて探る必要がある[56]。一方、顧客の側でも、様々な企業が提供する多種多様な製品やサービスを試行して消費経験を積み重ねていく中から、それぞれの製品やサービスをどのような場面で、どのように使用すべきか、また、どのような

表4.1 製品ライフサイクルの目的、戦略の概略[57]

	導入期	成長期	成熟期	衰退期
マーケティング目的	製品認知と製品試用の促進	市場シェアの最大化	市場シェアを守りつつ利益を最大化	支出の減少とブランドの収穫
戦略				
製品	基本製品の提供	製品拡張、サービスと保証の提供	ブランドと製品アイテムのモデルの多様化	弱いモデルの段階的除去
価格	コストプラス方式の採用	市場浸透価格	競合他社に匹敵する価格で競合他社をしのぐ価格	値下げ
流通	選択的流通の構築	開放的流通の構築	より進んだ開放的流通の構築	選択的流通への回帰:収益性の低い販売店の除去
広告	イノベーターとディーラーにおける製品認知の確立	マス市場における認知と関心の確立	ブランドの差異とベネフィットの強調	中核となるロイヤルユーザーの維持に必要なレベルまで縮小
販売促進	製品試用の促進を目的とした大規模な販売促進の利用	縮小して大量の消費者需要を利用	ブランド・スイッチングを促進するために拡大	最小レベルまで縮小

コトラー、2008、P241の図を一部改訂

機能を備えているべきか、などの評価基準を次第に確立していくことになる。

製品の導入から衰退に至るまでのライフサイクルは、一般的に導入期、成長期、成熟期、衰退期の4つの段階に分けられる。コトラー(2008)は、各段階に対応したマーケティング戦略が必要になると指摘している[57]。製品ライフサイクルにおけるマーケティングの目的と戦略の概略を表4.1に示す[57]。この中で導入期のマーケティング目的は、製品認知と製品試用の促進としている。そのための実践項目として次の3点をあげている。

- 基本製品の提供:セールスポイントを一つか二つに絞り顧客に強いインパクトを与える必要がある。

- 選択的流通の構築:対象顧客にアクセスする販路を構築し、自社の顧客層のコアを形成する。
- 製品試用の促進:イノベーターのニーズを製品に反映させるためのフィードバックループを確立する。すなわち、新製品は目新しいが、荒削りな部分が多いので、イノベーターの要望や満足度を聞き、その情報をもとに製品の改良を行う。それと共にアーリーアダプター、マス・フォロワのニーズに合わせた製品価値の見直しを行う。

4.2.2 中性子二次元検出器の市場開拓を目指した実践項目

導入期における実践項目の一つに基本製品の提供がある(表4.1)。しかし、上述のようにユーザーが中性子線を利用する機会自体が少ないことから、ユーザーは中性子二次元検出器の利用経験を積み重ねることができていない。そのため、メーカーはユーザーの要望や満足度といった製品の改良に必要な情報を得にくい状況にある。したがって、市場を開拓するために今なすべきことは、数少ない中性子線利用機会を有するイノベーターとメーカーとの間で共通の評価基準の確立を目指すことである。これを実現するために競争戦略論とマーケティング論に基づいた導入期の市場開拓者が行う実践項目を3つに整理し、その実践を行った。1つめは独自価値のある製品の開発、2つめはイノベーターへのアクセスの実践、3つ目はイノベーターへのフィードバックループの確立と製品価値の継続的な更新である。

- 独自価値のある製品の開発

ユーザーと製品に関する対話を行うために、まずはたたき台としての製品、または試作品などが必要である。メーカーがその分野での製品供給に興味があることをユーザーに示す作用も重要である。そして、ユーザーが企業に問い合わせを行う動機となるためにも、特徴ある独自価値のある製品を開発することが重要である。中性子二次元検出器の独自価値には第1章に示したように時間分解能や空間分解能があった。本研究ではセールスポイントを高空間分解能に絞り開発を行う。開発の詳細は第3章で述べた。

- イノベーターへのアクセス

たたき台としての開発品は、製品として荒削りな部分が多いためイノベーターから得られたニーズを製品に反映させることが必要である。それには、イノベーターへのアクセスの構築が重要となる。すなわち、中性子二次元検出器のイノベーターに開

発品を認知してもらい、製品開発に必要な情報を得ることが重要である。イノベーターは、J-PARCなどで中性子イメージング実験を行っているまたは検討している企業、中性子線源研究者、中性子検出器研究者などが考えられる。中性子線利用は現在利用しにくい状況にあるが、これらのユーザーは数少ない中性子線利用機会を有しており、イノベーターとして最適である。また、中性子二次元検出器のユーザー(企業)は、中性子線源が誰もが扱えるものではないため、中性子線源研究者と共に実験計画を立てる必要がある。実験を計画する際には、中性子線源や検出器の研究者も参加している。すなわち、中性子源や検出器の研究者は、企業のニーズやそれを満たすための課題(シーズの課題)を把握している。

中性子検出器のイノベーターはお互いの情報交換を行う場に学会、研究会等を利用している。そのため、イノベーターへ開発品を認知してもらうためには、学会、研究会を利用することがよいと考えた。それにより中性子二次元検出器のユーザーのニーズやそれに対する要望を聞くことができる。国内では例えば、日本中性子科学会、J-PARC/MLF中性子産業利用報告会、量子ビームサイエンスフェスタ等が想定される。そのような場で成果発表や企業展示を行うことでイノベーターの認知を得て、アクセスを獲得していくことを目指す。イノベーターとのアクセスを確立することは、イノベーターのニーズやシーズの課題の情報を得ることに繋がる。

- イノベーターとのフィードバックループの確立と製品価値の継続的な更新

イノベーターから得た情報を元に製品の改良を行っていくが、情報が少ないと特定のユーザーのニーズしか満たすことできない製品になる可能性がある。それを防ぐにはできるだけ多くの情報を集める必要がある。そのためにユーザーが実際に製品を利用した情報を集め、その結果を元に改良しそれを繰り返すこと、つまりフィードバックをループさせることが重要である。ユーザーが製品を利用する方法には、ユーザーに評価機を利用してもらい、共同で実験を行うなどがある。

一方で、ユーザーからの情報は、メーカーがまだ気づいていない開発品の新しい価値すなわち潜在価値の発見にもつながる。そのため、ユーザーとの対話により製品の価値を継続的に見直すことは重要である。

以上のことから、導入期中の中性子検出器事業においてはフィードバックループの確立および製品価値の継続的な更新は、メーカーとユーザーの共通の評価基準の確立に重要である。

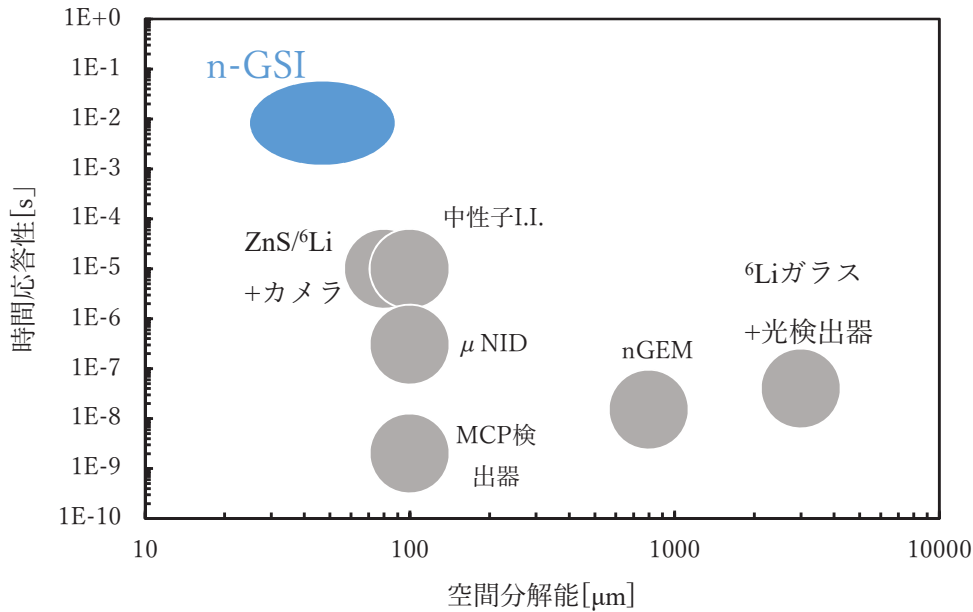


図4.1 セールスポイントが空間分解能であるn-GSI

4.3 実践項目の遂行

前節で整理した実践項目の遂行を行った。すなわち、メーカーとユーザーの間で共通の評価基準を確立することをまずは目指した。そのために、メーカーとユーザーが試行錯誤をしていく環境を作ることが重要であると考えた。それを目指して以下の実践を行った。

4.3.1 実践1 独自価値のある製品の開発

実践のはじめに独自価値のある製品の開発を行った。独自価値として空間分解能に着目し、中性子イメージング装置(n-GSI)を開発した。開発の詳細は第3章に述べた。開発品の空間分解能は約80 μmであった。さらに、この方式の空間分解能の実際的限界は22 μmであり、より高い空間分解能の実現が期待できる。図4.1に開発品のポジションを示す。n-GSIの空間分解能は他の検出器より優れていることがわかる。これにより、従来の検出器では対応できなかった半導体やコンクリートの検査に対応できる可能性ができた。

4.3.2 実践2 イノベーターへのアクセスの実践

次に前節の独自価値のある開発品を認知してもらうため、イノベーターへのアクセスを

表4.2 n-GSI認知活動

	発表先	開催日	方式
1	フォトンフェア2018	2018/11/1-3	ポスター発表 中性子ガスシンチレータ 展示
2	第18回日本中性子科学会年会	2018/12/4-5	ポスター発表
3	VCI2019	2019/2/18-22	ポスター発表(共同研究者) proceedings(受理)
4	2018年度量子ビーム サイエンスフェスタ	2019/3/12-13	ポスター発表 n-GSI展示

実践した。中性子二次元検出器のイノベーターは、J-PARCなどで中性子イメージング実験を行っているまたは検討している企業、中性子線源担当者、中性子検出器研究者などであった。これらの顧客候補が集まるところを調べたところ、学会や研究会があった。そこで、表4.2に示す学会、研究会、展示会にて開発品(n-GSI)の成果発表を行った。

1. フォトンフェア2018は、浜松ホトニクス株式会社が5年に1回開催している光技術に関する展示会である。展示会には、研究者、産業分野、一般者と幅広い人が参加した。成果発表はポスター展示を行った。
2. 第18回日本中性子科学会年会は日本中性子科学会が毎年開催している年会である。学会には、中性子の専門家、中性子線利用に興味を持つ企業などが参加した。成果発表はポスターで行った。
3. VCI2019は、15th VIENNA CONFERENCE ON INSTRUMENTATION で3年に1回のペースで開催されている。発表はポスターで行った。この発表は n-GSI の共同研究者が行った。
4. 2018年度量子ビームサイエンスフェスタは、量子ビームである放射光、中性子、ミュオン、低速陽電子の総合的な利用促進を目的に年1回開催されている。フェスタには、量子ビームの研究者、量子ビームの利用を検討している企業などが参加していた。H社の開発品紹介として企業展示を行った。

成果の発表を行い、19名の学術研究者および企業内研究者からコメントが得られた。その内訳は、検出器研究者が53%、中性子線源研究者が26%、企業内研究者が21%であった(図

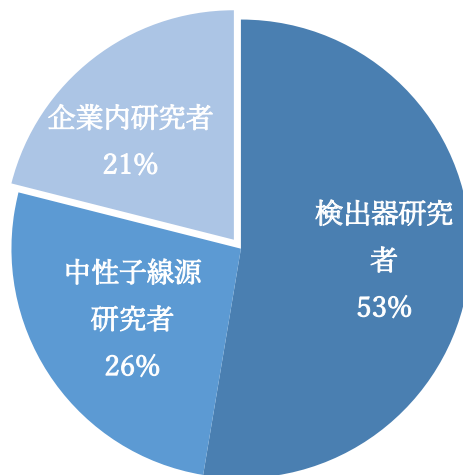


図4.2 n-GSIに興味を持った研究者の内訳

4.2)。検出器、中性子線源の学術研究者によるコメントが8割を占めた。これは、中性子二次元検出器がまだ開発段階であり、企業の認知度が低いことを示していると考えられる。

得られたコメントは主に次の3つに分けられた。高空間分解能イメージングのニーズ、高空間分解能達成手法への興味、特性改善要望である。

- 高空間分解能イメージングのニーズ

企業内研究者からは、彼らが抱えている課題を聞くことができた。課題には電子部品の検査、コンクリート内部の検査、鋼板内の検査、燃料電池研究などがあり、解決手法の一つとして中性子線の利用を検討していた。しかし、それらは既存中性子検出器の100 μm 以下の空間分解能では検査することが難しかった。電子部品やコンクリート内部の検査では数十 μm 、鋼板内検査や燃料電池研究では10 μm 以上の空間分解能を必要としていた。従来の検出器より高い空間分解能を有する n-GSI はこれらに対応できる可能性を持っていた。そのため、「製品化の予定はいつ頃か。」、「カタログがあるなら頂きたい。」、「検出器の評価を我々が開発している線源で行ってもよい。」などと開発品に対して高い興味を示すコメントが得られた。したがって、ユーザーの抱える課題を既存検出器では解決できないが n-GSI であれば解決できるニーズがあることが明らかになった。すなわち顧客の候補を発見できた。

- 高空間分解能達成手法への興味

中性子検出器の研究者は、高空間分解能達成の技術に興味を持った。例えば、ガス電子

表4.3 n-GSIの現行スペックと成果発表で得られた要求スペック

特性	現行スペック	要求スペック
時間分解能	1 ms	10 μ s
検出効率	4%	20%以上
有効面積	$\sim \phi$ 25 mm	10、20、50、100 mm ²
γ 線	—	n/ γ 比10 ⁻⁶ 以下
計数率	—	100 MHz(10 ns)

増幅型検出器では、中性子とコンバーターの核反応で発生した荷電粒子のガス領域中での飛程が課題であったが、それを小さな空間で区切るという手法に興味を示した。更にこの技術の発展可能性についての議論も行うことができた。つまり、独自価値のある製品開発の成果発表は中性子検出器研究者へのアクセスにつながった。

● 特性改善要望

n-GSI はたたき台であるため、ユーザーのニーズや要望を元に改良していく必要がある。n-GSI に対する要望は、主に学術研究者から得られた。改善要望のあった機能は、空間分解能、時間分解能、検出効率、有効面積、 γ 線に対する感度、計数率などがあつた。表4.3に機能と n-GSI の現行スペックおよび要求スペックを示す。高空間分解能化はより小さい領域の分析が行えるようになる。高時間分解能化は最近開発されたエネルギー分析イメージングを行うことができるようになる。高検出効率化は測定時間の短縮や低い線量下でも測定が可能となる。大有効面積化は大きな物質の検査を行うことができ測定時間の短縮につながる。低 γ 線感度化はノイズの少ない信号が得られ、長時間の測定でも信号対ノイズ比のよい画像が得られる。高計数率化は中性子の数え落としがなくなることで測定結果の定量性が向上する。

これらの要望に対する対応は今後の課題である。

想定顧客候補へアクセスできたことで、ユーザーのニーズやその実現に必要な機能の情報を得ることができた。独自価値のある製品開発がなければこのような情報は得られなかった。

また、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)のプログラムである産業ニーズ対応タイプ「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」に参加し、積極的にイノ

ベーターへのアクセスを試みた。中性子線の産業応用に向けた研究は、国家プロジェクトなどを利用してクローズドなコミュニティで行われていたため、そこにメンバーとして参加し、顧客候補、競合に関する情報を収集した。イノベーター候補であるコンパクト中性子源の開発研究者へアセスすることができた。また、自動車業界、鉄鋼業界など産業での利用を期待するアーリーアダプター候補の選定につながる情報を得ることができた。

4.3.3 実践3-1 フィードバック

できるだけ多くのユーザーから集めた情報を製品に反映させる方が製品の成功確率は向上する。そのためには実際にユーザーが開発品を試用しその評価を製品にフィードバックし、それを繰り返すという試行錯誤を行うことが重要である。まずは、はじめのフィードバックを得るため次の2点を行った。

- 引き合い顧客への評価機提案

成果発表時に引き合いのあった顧客を訪問し、ニーズ等の調査を行った。そして、ユーザーが検討を行っている中性子線利用にn-GSIの評価機を提案した。

ユーザーからは、ユーザーが抱える課題、中性子線の利用を検討した経緯、空間分解能を必要とする理由などの情報を得ることができた。得られた情報の一例を以下に示す。

課題は出来上がった製品の不良の発見であった。製品の不良の原因である数十 μm の大きさの欠陥、亀裂を非破壊で発見したいが、X線を用いた検査ではそれらを判別することができていなかった。そこで、解決案として中性子イメージングを検討していた。不良を発見するために検出器に必要な機能は、空間分解能は数十 μm 、視野は20 mm^2 であった。しかし、既存の検出器では、空間分解能の不足や予算を超えるなどの問題があった。そのような中、展示会でn-GSIのことを知った。n-GSIの機能は、ユーザーの課題を解決する可能性を持っていた。

また、ユーザーは、試料と検出器を中性子線源施設に持ち込んで中性子イメージングの実験を行うことを考えていた。そこで、n-GSIを実験で使用する検出器の候補の一つにするよう提案を行った。その結果、n-GSIはユーザーが使用する検出器の候補の一つとなることができた。すなわち、この引き合い顧客はn-GSIの評価機利用の候補者となった。

- 小型加速器型中性子線源でn-GSIを評価

中性子線は誰でも扱えるものではないため、その利用には中性子線源施設の担当者(研究者)の協力が必要である。そのため、中性子線源施設での検出器評価実験は研究者に対する

検出器のアピールにも繋がると考えた。そこで、今後の利用拡大が期待される小型加速器型中性子線源施設でのn-GSIの評価実験を行った。

検出器評価実験は計画から、セットアップ、データ取得、片付けまで線源研究者と共に行った。実験は線源研究者のn-GSIに対する理解に繋がった。これにより、n-GSIに対して次のフィードバックが得られた。空間分解能は、実験を行った施設が所有している検出器の空間分解能(400 μm)より高い空間分解能を有していた。そのため、他の実験でn-GSIを使用してみたいとの評価が得られた。この線源研究者もn-GSIの評価機利用の候補者となった。

また、改善要望が2点得られた。一つは装置の放射線遮蔽であり、取得画像にノイズが多かったため、 γ 線や高速中性子に対する遮蔽強化の要望が得られた。2つ目は操作性であり、カメラの光学系の調整部分で改善要望があった。更に、線源研究者にはこれまでの経験から中性子線利用のニーズも蓄積していた。新たに生物分野で中性子高空間分解能イメージングのニーズがあるとの情報を得ることができた。

以上のように、引き合い顧客や線源研究者にn-GSIの試用を促すことで、メーカーとユーザーが試行錯誤するための準備を行うことができた。

4.3.4 実践3-2 製品価値の見直し

n-GSIのセールスポイントは高空間分解能であるが、売れる製品にしていくには製品の価値の見直しを随時行う必要がある。成果発表では上述のようにユーザーから高空間分解能のニーズ得られ、開発の方向性が合っていることが確認された。一方で、ユーザーから得られた情報の中に空間分解能以外の価値の提案もあった。

それは、高計数率ガス電子増幅型検出器である。読み出しを二次元ではなく0次元とした時、ガス電子増幅部が高密度に並んでいることで高計数率を実現できる可能性がある。つまり、この技術は高計数率を必要とする計測においても利用できるという新たな可能性をもつことが見出された。

すなわち、独自価値をもつ技術開発を行いユーザーにアクセスすることにより、メーカーが考えていなかった新しい価値の発見に繋がった。

4.4 今後の方針

メーカーとイノベーターが試行錯誤することにより、製品の改良が行われ、次第に技術

と用途が結びついていく。しかし、それだけでは需要が拡大することはなく、導入期から成長期へと移行しない。需要が拡大し、市場が成長期へと移行するための方策の検討を行った。

導入期では、まず、主なユーザーであるイノベーターとの共通の評価基準を確立する必要がある。例えば、中性子二次元検出器における導入期のイノベーターは、既に中性子線を利用している、または利用を検討している研究者であった。

成長期への移行を目指すとき、新たな需要層の獲得を行う必要がある。そのためには、イノベーターとの間で確立された計測の基準を新たな需要層の候補に魅力ある形に変化させていく必要がある。そこで、新たな需要層候補の属性を想定しその層へ提示すべき計測の基準の在り方について検討する。想定される新たな需要層候補としては、例えば、X線などで非破壊検査を行ったことがある人たちが挙げられる。この層は非破壊検査についての基本的な知識と経験を有しつつ、その新たな可能性の模索も行っていると期待できる。この層にX線等の透視画像と相補的に機能する中性子透過画像の魅力を示し、非破壊検査の新たな可能性を示すことで中性子検出器市場の顧客候補に誘導することを考える。この層が中性子計測に対して抱いている印象を想像するに、何が見えるかわからない、どこに行けばよいかかわからない、誰に相談すればよいかかわからない、費用や時間がどれくらいかかるかわからないといったような基本的なことが知られていないように思われる。特に、費用や時間については、イノベーターとの間ですら基準が確立されているとは言い難いが、これらは導入期に目安が確立されていくはずである。場所や人については広報すればよい。あとは何が見えるかを新たな需要層に対して魅力的にアピールすればよい。ただし、イノベーターが研究者のような採算性を第一優先としていない層であるのに対し、アーリーアダプターは実業界に存在しており、採算性とリンクした形で魅力をアピールする必要がある。したがって、何がどのように見えるかに加え、それに要する時間と費用を合わせて提示する必要がある。3.3.4節では、中性子透過画像の見え方とその取得に必要な時間について議論した。たとえば、図4.3のように実際的な形で共通の評価基準を提示すれば実用に供するであろう層への強いアピールになることが想定される。図4.3のような情報から時間と費用を見積もることが可能となる。

したがって、メーカーは導入期にはイノベーターとの共通の評価基準を確立しつつ、単純に技術的な評価基準を定めるのではなく、アーリーアダプター候補が参入しやすくなるための評価基準を作っていく必要がある。

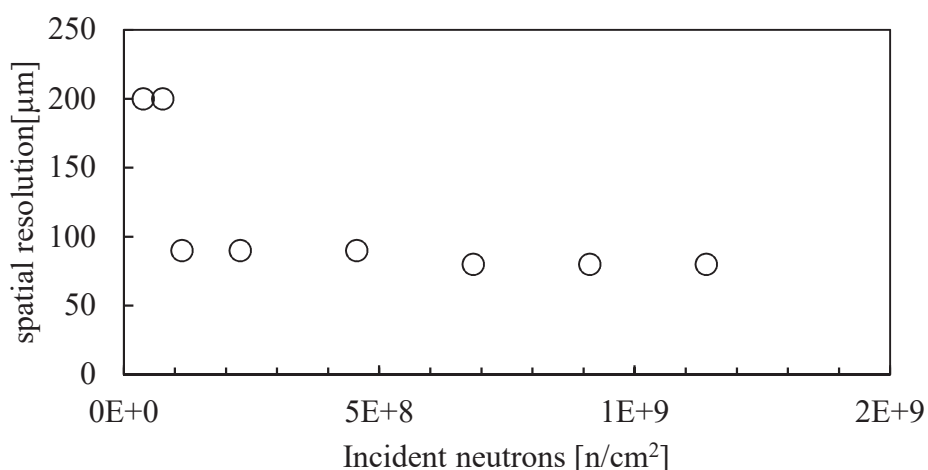


図4.3 入射中性子量と空間分解能の関係(図3.39再掲)

4.5 第4章まとめ

本章では、開発した二次元検出器を用いて市場開拓の初期の実践について述べた。中性子検出器の世界市場は、2018年には423 MS\$が2023年には1107 MS\$へと成長が見込まれている。一方で、3C分析してみたところ導入期を脱していないことがわかった。そこで、戦略論とマーケティング論に基づいた導入期の実践項目を実践した。例えば、導入期ではメーカーとユーザーの共通の評価基準が確立されていない時期であり、それを確立することが急務である。そのためには、メーカーとユーザーは試行錯誤ができる環境を作ることが重要である。したがって、メーカーとしては独自価値のある製品を市場に投げかけるとともに、イノベーターへアクセスし、フィードバックループを確立する必要がある。これらの実践を試みた。この指針に基づき開発した製品を市場に提示する活動を行ったところ、複数の第一顧客候補にアクセスすることに成功した。そして、評価機の試用に向けた相談を進めており、試行錯誤環境構築の緒に就くことに成功した。メーカーとユーザーの相互協力により共通の評価基準を確立し、市場の形成を目指すとともに、今後成長期に向かうためにはアーリーアダプター候補が参入しやすくなるための評価基準を作っていく必要がある。

第5章 結論

本研究では、ガスシンチレーション方式高空間分解能中性子イメージング装置を開発し、市場開拓の初期戦略を実践した。

序論では、中性子線の産業利用における中性子検出器の市場と課題と本研究の目的を論じた。中性子線の特長を活かして、二次電池や鉄鋼材の不良分析、インフラストラクチャの非破壊検査など中性子線利用の拡大が期待されている。国内では中性子線を利用するための産業基盤が整っていないため中性子検出器の市場は未成熟である。このような状況にある中性子二次元検出器市場にメーカーが新しい製品を投入する時、既存製品と差別化を図り製品の認知度を高めることが重要である。それを足掛りにメーカーとユーザーが試行錯誤し、メーカーとユーザーの間で共通の評価基準が確立していくが重要である。

そこで、本研究では、このような状況にある中性子検出器市場の開拓を目指し、次のことを目的とした。

- キャピラリープレートを用いたガス電子増幅型の中性子検出器の開発を行い、高空間分解能な画像の取得を行う。
- 市場開拓の初期に行うべき戦略をまとめ、それを実践する。

第2章では、本研究の核となる技術である中性子変換材料(コンバーター)とキャピラリープレート (capillary plate: CP) を用いたガス電子増幅型の検出器(CP gas detector: CPGD)の先行研究について述べた。

- 熱中性子ガス電子増幅検出器に適している中性子コンバーターは ^{10}B であった。
- CPGD は、高空間分解能、高い電子増幅度、安定動作などの特徴を持つ二次元検出器である。更に、 γ 線に低感度、材料の中性子耐性もあることから中性子検出器として有望であった。

続く第3章では、中性子コンバーターと CPGD を組合せたガスシンチレーション方式高空間分解能中性子イメージング装置の開発について述べた。

- 中性子検出用ガス電子増幅型検出器(n-CPGD)を新規に開発した。

上記検出器と光学系を組み合わせたガスシンチレーション方式中性子イメージング装置(n-GSI)を構築し、中性子線源を用いて検出器の評価を行った。

- 一つの中性子入射(中性子シングルイベント)に対する信号の取得を達成した。(査読

論文1)

空間分解能の向上のため検出器の改良を行い、

- KURでの評価実験で達成した空間分解能は76 μm であった。(査読論文2)

検出器を用いて線源の拡がりや入射中性子線量が空間分解能に与える影響を調べた。線源によるビームの拡がりや空間分解能の関係から、開発した検出器は、ビームに拡がりがない場合、68 μm の空間分解能があると推測された。

入射中性子線量と空間分解能の関係を調べた。異なる中性子線源を利用したときに希望する空間分解能を得るために必要な撮像時間を推定できるようになった。

- 実用的なサンプル(ネジ)の中性子透過像を撮像した。

ボルトとナットのかみ合わせを非破壊で観察できた。これはX線イメージングでは得ることが難しく、中性子線の特徴を活かしたイメージングに成功した。

また、より空間分解能を高める方策を検討した。n-CPGDは実際的には22 μm の空間分解能を達成できる可能性があり、それを実現するための方策の検討を行った。

以上のように、中性子コンバーターを内蔵し、キャピラリープレートを用いたガス電子増幅による中性子二次元検出器の開発に世界で初めて成功した。達成した空間分解能は76 μm であった。

第4章では、中性子二次元検出器の市場を開拓するための経営理論に基づく市場分析と理論で提唱されている初期の実践項目とその遂行について述べた。中性子検出器の世界市場は成長が見込まれている。一方で、3C分析により、導入期を脱していないことがわかった。そこで、競争戦略論とマーケティング論に基づいた導入期の実践項目を実践した。導入期ではメーカーとユーザーの共通の評価基準が確立されていない時期であり、それを確立することが重要である。そのためには、メーカーとユーザーは試行錯誤ができる環境を作ることが重要である。したがって、メーカーとしては独自価値のある製品を市場に投げかけるとともに、イノベーターへアクセスし、フィードバックループを確立する必要がある。この指針に基づき開発した製品を市場に提示する活動を行ったところ、

- 複数の第一顧客候補にアクセスすることに成功した。そして、評価機の試用に向けた相談を進めており、試行錯誤環境構築の緒に就くことに成功した。

今後は、メーカーとユーザーの相互協力により共通の評価基準を確立し、市場の形成を目指すとともに、中性子検出器市場が成長期に向かうためにはアーリーアダプター候補が参入しやすくなるための評価基準を作っていく。それにより、中性子線の利用が促進する

ことで非破壊分析手法が確立され、新製品開発、不良低減に貢献していく。

参考文献

- [1] 池田泰, 中性子イメージングの航空・宇宙, 自動車, 防衛産業への応用, *Radioisotopes*. 56 (2007) 339–350. doi:10.3769/radioisotopes.56.339.
- [2] INDUSTRYARC, NEUTRON DETECTION MARKET; By Technology (Geiger Counter, Spectroscopy, Organic Scintillator, Neutron Sandwich), By Use, By type, By Application, & By Geography - 2019 - 2024, 2019.
- [3] T. Shinohara, T. Kai, K. Oikawa, M. Segawa, M. Harada, T. Nakatani, M. Ooi, K. Aizawa, H. Sato, T. Kamiyama, H. Yokota, T. Sera, K. Mochiki, Y. Kiyonagi, Final design of the Energy-Resolved Neutron Imaging System “RADEN” at J-PARC, *J. Phys. Conf. Ser.* 746 (2016) 012007. doi:10.1088/1742-6596/746/1/012007.
- [4] S. KAWABATA, Brain Tumor, *Radioisotopes*. 64 (2015) 93–102. doi:10.3769/radioisotopes.64.93.
- [5] 南東北BNCT研究センター | ホウ素中性子捕捉療法, <http://southerntohoku-bnct.com/> (accessed September 6, 2019).
- [6] Y. Kiyonagi, Present Status of the Neutron Radiography in Japan and Other Countries, *Japanese Soc. Non-Destructive Insp.* 65 (2016) 3–9. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40020705995/ja/>
- [7] 鬼柳, 善明, 加速器を用いた中性子源 (特集 広がる加速器の利用 中性子), 加速器 日本加速器学会誌. 13 (2016) 192–197. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40021081013/ja/>.
- [8] K. Masuda, Nuclear Fusion Based Neutron Sources, *Hamon*. 27 (2017) 113–116. doi:10.5611/hamon.27.3_113.
- [9] 松林政仁, 中性子イメージングの中性子源, *Radioisotopes*. 56 (2007) 479–486. doi:10.3769/radioisotopes.56.479.
- [10] M. Roth, D. Jung, K. Falk, N. Guler, O. Deppert, M. Devlin, A. Favalli, J. Fernandez, D. Gautier, M. Geissel, R. Haight, C.E. Hamilton, B.M. Hegelich, R.P. Johnson, F. Merrill, G. Schaumann, K. Schoenberg, M. Schollmeier, T. Shimada, T. Taddeucci, J.L. Tybo, F. Wagner, S.A. Wender, C.H. Wilde, G.A. Wurden, Bright laser-driven neutron source based on the relativistic transparency of solids, *Phys. Rev. Lett.* (2013). doi:10.1103/PhysRevLett.110.044802.
- [11] 森芳孝, 安部勇輝, 田中浩基, 花山良平, 鬼柳善明, 長友英夫, 砂原淳, レーザー駆動中性子源の特徴 (「レーザー駆動中性子源の研究開発動向」特集号), *レーザー研究 = Rev. Laser Eng.* レーザー学会誌. 46 (2018) 564–570. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40021711059/ja/>
- [12] 林真琴, H29年度J-PARC/MLF産業利用報告会 中性子産業利用の現状, (2017).
- [13] Y. Otake, Y. Seki, Y. Wakabayashi, Y. Ikeda, T. Hashiguchi, Y. Yoshimura, H. Sunaga, A. Taketani, M. Mizuta, Y. Oshima, M. Ishida, Research and Development of a Non-Destructive Inspection Technique with a Compact Neutron Source, *J. Disaster Res.* 12 (2017) 585–592. doi:10.20965/jdr.2017.p0585.
- [14] RANS – 理研の小型中性子源システム「RANS」, <http://rans.riken.jp/> (accessed October 1, 2019).
- [15] 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP: 採択課題 平成27年度【ステージI】産業ニーズ対応タイプ, https://www.jst.go.jp/a-step/kadai/h27-2s1/h27_sangyo01.html (accessed December 10, 2019).
- [16] 理工学部会 中性子応用専門委員会, 中性子イメージングカタログ／中性子施設ハンドブック, 2018. <https://www.jrias.or.jp/report/cat1/218.html>.
- [17] 林真琴, H30年度J-PARC/MLF産業利用報告会 中性子産業利用の現状, (2018).
- [18] 日本原子力研究開発機構 JRR-3, <https://jrr3.jaea.go.jp/3/32.htm> (accessed October 1, 2019).
- [19] 藤原健, 国内外の中性子利用と中性子検出器の現状に関する調査研究, 産総研計量標準

報告. 9 (2018) 439.

- [20] M. Segawa, K. Oikawa, T. Kai, T. Shinohara, H. Hayashida, Y. Matsumoto, J.D. Parker, T. Nakatani, K. Hiroi, Y. Su, Y. Kiyonagi, Spatial Resolution Test Targets Made of Gadolinium and Gold for Conventional and Resonance Neutron Imaging, in: Proc. Int. Conf. Neutron Opt., Journal of the Physical Society of Japan, 2018. doi:10.7566/JPSCP.22.011028.
- [21] 松本哲郎, 多目的中性子利用に対する中性子標準開発と中性子計測技術に関する調査研究, 産総研計量標準報. 6 (2007) 151–164. <http://ci.nii.ac.jp/naid/80018223516/ja/>
- [22] K. Nittoh, C. Konagai, T. Noji, K. Miyabe, New feature of the neutron color image intensifier, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 605 (2009) 107–110. doi:10.1016/j.nima.2009.01.136.
- [23] K. Nittoh, C. Konagai, M. Yahagi, Y. Kiyonagi, T. Kamiyama, Development of Neutron Color Image Intensifier for Pulsed Neutron Source, Phys. Procedia. 69 (2015) 177–184. doi:10.1016/J.PHPRO.2015.07.025.
- [24] S. Uno, T. Uchida, M. Sekimoto, T. Murakami, K. Miyama, M. Shoji, E. Nakano, T. Koike, K. Morita, H. Satoh, T. Kamiyama, Y. Kiyonagi, Two-dimensional Neutron Detector with GEM and its Applications, Phys. Procedia. (2012). doi:10.1016/j.phpro.2012.03.019.
- [25] H. Ohshita, S. Uno, T. Otomo, T. Koike, T. Murakami, S. Satoh, M. Sekimoto, T. Uchida, Development of a neutron detector with a GEM, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 623 (2010) 126–128. doi:10.1016/j.nima.2010.02.170.
- [26] nGEM | Bee Beans Technologies Co.,Ltd., <https://www.bbtech.co.jp/products/ngem/> (accessed September 3, 2019).
- [27] F. Sauli, The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 805 (2016) 2–24. doi:10.1016/j.nima.2015.07.060.
- [28] J. D. Parker, M. Harada, H. Hayashida, K. Hiroi, T. Kai, Y. Matsumoto, K. Oikawa, Y. Su, T. Shinohara, Y. Kiyonagi, Counting-type Neutron Imaging Detectors at RADEN/BL22, Hamon. 27 (2017) 24–28. doi:10.5611/hamon.27.1_24.
- [29] T. Fujiwara, Y. Mitsuya, H. Takahashi, Radiation imaging with glass gas electron multipliers (G-GEMs), Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 878 (2018) 40–49. doi:10.1016/J.NIMA.2017.09.010.
- [30] J.D. Parker, M. Harada, K. Hattori, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, T. Mizumoto, H. Nishimura, T. Oku, T. Sawano, T. Shinohara, J. Suzuki, A. Takada, T. Tanimori, K. Ueno, Spatial resolution of a μ PIC-based neutron imaging detector, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 726 (2013) 155–161. doi:10.1016/J.NIMA.2013.06.001.
- [31] J. Don Parker, M. Harada, H. Hayashida, K. Hiroi, T. Kai, Y. Matsumoto, T. Nakatani, K. Oikawa, M. Segawa, T. Shinohara, Y. Su, A. Takada, T. Takemura, T. Taniguchi, T. Tanimori, Y. Kiyonagi, Development of Energy-Resolved Neutron Imaging Detectors at RADEN, in: Proc. Int. Conf. Neutron Opt., Journal of the Physical Society of Japan, 2018. doi:10.7566/JPSCP.22.011022.
- [32] J. Parker, Development of a counting-type neutron imaging detector for energy- resolved imaging at J-PARC / MLF RADEN / BL22 and μ NID development members, (2016).
- [33] S. Satoh, Development of a 2012 Model for the 6Li Time Analyzer Detector System, Phys. Procedia. 60 (2014) 363–368. doi:10.1016/J.PHPRO.2014.11.049.
- [34] A.S. Tremsin, J.B. McPhate, J.V. Vallerga, O.H.W. Siegmund, J.S. Hull, W.B. Feller, E. Lehmann, High-resolution neutron radiography with microchannel plates: Proof-of-principle experiments at PSI, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. 605 (2009) 103–106. doi:10.1016/J.NIMA.2009.01.137.
- [35] O.H.W. Siegmund, J. V. Vallerga, A.S. Tremsin, W.B. Feller, High Spatial and Temporal Resolution Neutron Imaging With Microchannel Plate Detectors, IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (2009) 1203–1209. doi:10.1109/TNS.2009.2015310.
- [36] S.D. Pinto, R. Ortega, S. Ritzau, D. Pasquale, B. Laprade, S. Mrotek, S. Gardell, Z. Zhou, J. Plomp, L. van Eijck, H. Bilheux, I. Dhiman, Neutron imaging and tomography with MCPS, J. Instrum. 12 (2017) C12006–C12006. doi:10.1088/1748-0221/12/12/C12006.
- [37] N氏の新たな冒険：中性子(Neutron)と、それに魅せられた仲間たち, 波紋 Neutron Netw. News. 24 (2014) 46p. <https://ci.nii.ac.jp/naid/40020286189/> (accessed July 30, 2019).

- [38] G.F. Knoll, 神野郁夫, 木村逸郎, 阪井英次, 放射線計測ハンドブック, 第4版, オーム社, 2013. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BB13533298.bib>
- [39] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohasawa, others, JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering, *J. Nucl. Sci. Technol.* 48 (2011) 1–30.
- [40] キャピラリプレート | 浜松ホトニクス,
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3200/3032/index.html> (accessed February 5, 2018).
- [41] MCP (マイクロチャンネルプレート) | 浜松ホトニクス,
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/electron_ion-sensor/mcp/index.html (accessed January 20, 2020).
- [42] H. Sakurai, T. Tamura, S. Gunji, M. Noma, A new type of proportional counter using a capillary plate, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 374 (1996) 341–344. doi:10.1016/0168-9002(96)00226-4.
- [43] F. Tokanai, T. Atsumi, T. Endo, Y. Fujita, Y. Ohishi, T. Okada, H. Sakurai, S. Gunji, S. Kishimoto, Developments of optical imaging capillary plate gas detector, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 567 (2006) 376–380. doi:10.1016/j.nima.2006.05.148.
- [44] F. Tokanai, H. Sakurai, S. Gunji, T. Sumiyoshi, H. Sugiyama, Y. Fujita, T. Atsumi, Y. Ohishi, T. Okada, S. Kishimoto, Evaluation of a capillary plate gas detector filled with Ne+CF₄ and Ar+CF₄ gas mixtures, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 581 (2007) 236–240. doi:10.1016/j.nima.2007.07.085.
- [45] S. SASAKI, Present Status of the Experimental Determination of W-values in Gases, *Radioisotopes.* 61 (2012) 415–427. doi:10.3769/radioisotopes.61.415.
- [46] H. Sugiyama, S. Ishizawa, R. Itoh, F. Tokanai, M. Hayashi, T. Okada, T. Sumiyoshi, S. Kishimoto, Development of a hole-type MPGD with funnel-capillary plate, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 845 (2016) 304–308. doi:10.1016/j.nima.2016.06.067.
- [47] H. Sakurai, S. Gunji, F. Tokanai, T. Maeda, N. Ujiie, N. Saitoh, Characteristics of an X-ray imaging detector with double capillary plates, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 513 (2003) 282–286. doi:10.1016/J.NIMA.2003.08.048.
- [48] 門叶, 冬樹, マイクロパターンガス検出器の進歩, *Isot. News.* (2008) 11–14.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/10024393557/ja/>
- [49] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P.-E. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, K. Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.* 55 (2018) 684–690. doi:10.1080/00223131.2017.1419890.
- [50] S. Tasaki, T. Nagae, M. Hirose, Y. Yamashita, K. Hironaka, Y. Abe, Y. Yamagata, Y. Otake, K. Hirota, Properties and Possible Applications of Kyoto University Accelerator Based Neutron Source (KUANS), *Phys. Procedia.* 60 (2014) 181–185. doi:10.1016/j.phpro.2014.11.026.
- [51] M. Hino, T. Oda, M. Kitaguchi, N.L. Yamada, S. Tasaki, Y. Kawabata, The ion beam sputtering facility at KURRI: Coatings for advanced neutron optical devices, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 797 (2015) 265–270. doi:10.1016/J.NIMA.2015.06.046.
- [52] N. Naganawa, T. Ariga, S. Awano, M. Hino, K. Hirota, H. Kawahara, M. Kitaguchi, K. Mishima, H.M. Shimizu, S. Tada, S. Tasaki, A. Umemoto, A cold/ultracold neutron detector using fine-grained nuclear emulsion with spatial resolution less than 100 nm, *Eur. Phys. J. C.* 78 (2018) 959. doi:10.1140/epjc/s10052-018-6395-7.
- [53] M. Hino, M. Sugiyama, T. Akiyoshi, Characteristics of CN3 neutron guide tube at KUR, *Annu. Reports Res. React. Institute, Kyoto Univ.* 26 (1994) 196–204.
https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:26047658
- [54] A.P. Kaestner, Z. Kis, M.J. Radebe, D. Mannes, J. Hovind, C. Grünzweig, N. Kardjilov, E.H. Lehmann, Samples to Determine the Resolution of Neutron Radiography and Tomography, *Phys. Procedia.* 88 (2017) 258–265. doi:10.1016/J.PHPRO.2017.06.036.
- [55] S.H. Williams, A. Hilger, N. Kardjilov, I. Manke, M. Strobl, P.A. Douissard, T. Martin, H. Riesemeier, J. Banhart, Detection system for microimaging with neutrons, *J. Instrum.* 7 (2012)

P02014-P02014. doi:10.1088/1748-0221/7/02/P02014.

- [56] M.E.ポーター, 土岐坤, 中辻萬治, 服部照夫, 新訂 競争の戦略, ダイヤモンド社, 1982.
- [57] フィリップ・コトラー, ケビン・レーン・ケラー, 恩藏直人, 月谷真紀, コトラー&ケラーのマーケティング・マネジメント 基本編 (第3版), ピアソン・エデュケーション, 2008.
- [58] 木村壽男, 開発成長企業の戦略, 同友館, 2009.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方からご指導、ご支援を賜りましたので、ここに感謝の意を表します。

光産業創成大学院大学 光・情報システム分野 花山良平准教授には、本論文の指導教員として多大なるご指導ご鞭撻を賜りました。花山先生には多面的なものの見方や考え方、論文執筆などを一から根気強くご指導いただきました。さらに、花山先生が参画するプロジェクトに参加させていただくことにより検出器のみならず発生源に対する見識も深めることができました。ここに深く感謝の意と敬意を表します。

本論文の主査を引き受けてくださいました光産業創成大学院大学 内藤康秀准教授ならびに副査を引き受けてくださいました東北大学 黒澤俊介准教授、光産業創成大学院大学 増田靖教授、森芳孝准教授に深く感謝申し上げます。特に増田靖先生には副指導教員として社会科学分野のご指導ご鞭撻をいただきました。先生方のご教示により、本論文の完成度が高まりました。ここに感謝の意を表します。

本論文執筆にあたりご教示いただきました光産業創成大学院大学 瀧口義浩学長、坪井昭彦教授、江田英雄教授、藤田和久教授、石井勝弘教授、横田浩章准教授、姜理恵准教授、沖原伸一郎准教授、平野美奈子講師、楠本利行助教に心より感謝いたします。特に瀧口学長ならびに石井先生には光情報・システム分野のゼミ等で様々なご指導ご鞭撻をいただきました。心より感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり様々なご指導及びご支援をいただきました共同研究者である首都大学東京 理学研究科 住吉孝行客員教授、山形大学 理学部 門叶冬樹教授、森谷透助教、伊藤龍太郎氏に心より感謝致します。特に門叶先生には実験や学術論文の執筆でのご指導をいただきました。また、京都大学 日野正裕准教授、田崎誠准教授、廣瀬昌憲氏には、本研究の推進並びに共同利用施設における実験に関して多大なご助力をいただきました。心より感謝いたします。

また、光産業創成大学院大学 加藤義章先生、三間圀興先生には、レーザー学会レーザー中性子源利用技術専門委員会に参画する機会を与えていただき、多くの研究者と交流することができ本研究の見識を深めることができました。心より感謝いたします。

光産業創成大学院大学 宇佐美健一先生、高谷周司先生、小山石行伸先生、加藤誠也先生に心より感謝いたします。大学主催のセミナーにて、マーケティングやビジネスプロデュースについてご教示下さりました。異業種の方々との交流により多くの刺激を受けることができました。

このような貴重な研究の機会を与えてくださいました、光産業創成大学院大学 晝馬明理事長、瀧口義浩学長および浜松ホトニクス株式会社 晝馬明社長、鈴木賢次事業部長、加藤久喜副事業部長、小澤勉部長、近藤稔グループ長、長谷川寛部門長に深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり多くのご協力をいただきました浜松ホトニクス株式会社 岡田晃行氏、杉山浩之氏、林雅宏氏、川嶋利幸氏、佐藤仲弘氏、渡利威士氏など多くの方に感謝致します。

光産業創成大学院大学 光情報・システム分野のゼミで有意義な議論をさせていただきました佐藤仲弘氏、林田亮氏、鈴木一隆氏、木畠宏樹氏、蒲原正広氏、星川雅春氏、鈴木那津輝氏に感謝いたします。また、学生生活を一緒に過ごした皆様にも感謝いたします。

楽しく研究に専念できる環境を与えてくださった光産業創成大学院大学の事務局の皆様にご礼申し上げます。

最後に、ここまで私を支えてくれた妻 けい子、長女 明日香、次女 祐菜にも感謝の意を表します。

2020年3月

近藤治靖

付録

専門家へのインタビュー・アンケート調査

中性子線利用環境は、J-PARC が安定稼働しはじめてはいるが、JRR-3はまだ停止状態であり、2011年以降大きな変化はない。中性子線利用が現在の延長線上であるならば、今後15-20年後も同じと状況となるかもしれない。中性子の専門家(研究者)たちは、中性子線利用を今後どのようにしていきたいと考えているのだろうか。専門家たちが考える未来像を共有するため、15-20年後に中性子線の利用はどうなっているか、そうなるためには必要なものは何か、障壁はなにかについて調査を行った。

調査対象者は、中性子の専門家とし、大学、日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構、中性子産業利用協議会、日本中性子科学会、企業などに属する中性子の研究者とした。調査は個人にインタビューまたはアンケートを行った。インタビューは、インタビューを訪問または研究会会場で行った。基本となるインタビューとアンケートの質問項目を表付録1.1に示す。アンケートの項目は、シナリオ・プランニング(ウェイド、2013)を参考にした。

インタビューおよびアンケートは9名に行った。9名の内訳は大学、公的機関研究者4名、企業所属研究者5名であった(表付録1.2)。また、インタビュー、アンケート以外に、H29年度 J-PARC/MLF 中性子産業利用報告会(2017年7月20-21日開催)[12]、平成27年度理研シンポジウム「小型中性子源 RANS が拓く中性子利用と大型施設との連携」(2017年12月21日開催)に参加し中性子利用についての情報を収集した。J-PARC/MLF 中性子産業利用報告会は、J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)における産業利用成果と、産業利用の拡大に向けた学術成果を総合的に紹介するとともに、産業界との連携を一層強化するために毎年開催されている。理研シンポジウムは、理化学研究所が開発する小型中性子源 RANS が目指す社会インフラ、モノづくりに貢献する非破壊計測技術開発の進展を紹介し今後の展開の検討を行うために毎年開催されている。それぞれの会には同じ研究者が多く参加していた。

中性子線利用の動向や課題はインタビュー、アンケート調査の結果と報告会等で得られた情報と似ていたことから、インタビュー・アンケート調査対象を9名以上増やさなかった。

表付録1.1 アンケート質問項目

設問No.	設問
1	もしあなたが中性子線産業利用の15-20年後の未来を見通せるとしたら、その特徴を最もよく表す2つか3つの事柄はなんでしょう？
2	楽観的に見ると、15年後と今とでは中性子線利用はどのように変わっていると思いますか？
3	悲観的に見ると、どうでしょうか？
4	その間に、中性子線に関するビジネス/市場環境はどう変わると思いますか？
5	15年後に中性子線産業利用がビジネスとして成功するためには、どのような変化が必要ですか？
6	15年後の私たち(弊社・所属先企業)の一番のライバルは誰だと思いますか？
7	乗り越えるべき壁(制約)はありますか？

インタビューおよびアンケートにより得られた回答のまとめを設問ごとに以下に示す。

設問1まとめ 未来の特徴

中性子の専門家は、中性子線産業利用の15-20年後における未来の特徴を以下のように考えていた。中性子線は大きく3つの分野で利用されている。一つは、学術研究分野で、大強度の中性子線や放射光を用いて未開拓領域の研究に利用される。2つ目は、医療分野で、正常な組織は破壊せずがん細胞だけを死滅させるがん治療 BNCT に利用され、治療が日本各地で行われている。3つ目は、産業利用分野で、中性子線の強度は弱いが中性子線を企業が非破壊検査などに使いたい時に利用している。

設問2まとめ 楽観的観点

中性子の専門家は楽観的に見ると15年後と今とで中性子線利用は次のように変わっていると考えていた。アンケートの回答では、「港・空港」、「創薬系ラボ」、「大学の研究室」、「中性子線源1台に複数のビームライン」、「各地方拠点に」、「民間への」など9人中8人が、中性子線を利用できる場所が増え、その利用が身近になる環境が整うと回答している。ま

表付録1.2 インタビューとアンケートの対象者

	インタビ ュイー	研究者の 分類	形式	日付 時間
1	A	大学	インタビューとアンケート	2017/2/9 1.5時間 アンケート回答2017/3/8
2	B	企業所属	インタビューとアンケート	2017/6/ 2時間 アンケート回答 2017/7/13
3	C	公的研究 機関	インタビュー	2017/6/29 3時間
4	D	公的研究 機関	インタビュー	2017/6/29 1時間
5	E	公的研究 機関	インタビューとアンケート	2017/7/20 0.5時間 アンケート回答 2017/7/29
6	F	企業所属	インタビューとアンケート	2017/7/20 0.5時間 アンケート回答 2017/8/7
7	G	企業所属	インタビュー	2017/8/8 1時間
8	H	大学	インタビュー	2017/9/22 2時間
9	I	企業所属	インタビューとアンケート	2017/9/27 0.5時間 アンケート回答 2017/10/13

た、大型施設の安定稼働により研究の質と量が拡大していく。

中性子線を身近に扱えることによる実験の量と、先端研究の成果との相乗効果で中性子線の利用が魅力的になっていくと考えられる。

設問3まとめ 悲観的観点

悲観的に見る要因としては、施設の建設や維持にコストがかかる、利用場所が増えないと4人が答えている。競合技術が進歩し技術的な差別化ができない、放射線の安全性に対する不安から利用が拡大しないを挙げているのがそれぞれ2人。また、ニーズの開拓が進まない、認知度が低い、人材が不足すると答えている。これらの要因から、悲観的に見ると、中性子線の利用は、学術研究分野での利用のみ限定されたものとなり、産業利用へは拡大しない。つまり、現状では、コストが高い、技術開発が必要、利用場所が限定、研究者および利用者が少ない、ニーズが開拓できていないなど多くの課題があるといえる。中性子

線の利用を拡大するには、これら多くの課題を解決していく必要がある。

設問4まとめ ビジネス/市場環境変化

中性子線利用に関するビジネス/市場環境に以下のような変化がある。

アカデミアの研究対象から産業応用に移行する黎明期に変わること、新規材料開発がより活発に行われるようになり、中性子線の利用が増える。J-PARC で得られたデータと SPring-8で得られたデータをスーパーコンピュータ京で解析し、連携活用による新しいタイヤ用ゴムの材料開発の成果が H29年度 J-PARC/MLF 産業利用報告会[12]で報告されていた。大強度中性子計測で得られたデータは、多様で広範囲な情報を必要とする AI 技術、ビッグデータ社会にも有用なものとなっていく。大型施設に関連するビジネスには、検出器、信号処理、データ解析などがある。

一方で、J-PARC のような大強度中性子の大型施設を複数増やしたいが、膨大なコストがかかるため、性能の高いものとある程度の性能で低コスト中性子線源を複数もつことにより、人材育成や研究と量の拡大を行いたいと考えている。そのためには、大学、研究室に小型の中性子線源が導入されるであろう。すると、周辺要素にビジネスチャンスがある。要素には、中性子源、検出器、解析装置、ソフト、施設の設置、運転、管理などが考えられる。

医療分野では、BNCT がここ数年で医療の承認が下り、各地で治療が始まり、施設も増えていくと考えられる。そのため、BNCT に付随する要素にビジネスチャンスがある。要素には例えば、加速器中性子線源、ビームモニタ、線量計、薬剤、治療計画、照射台などがある。

産業利用分野では、新規材料開発や新製品開発が活発に行われ、開発時の分析、試験に中性子線を利用する。利用には、依頼、施設を借りて実験、自社に導入が考えられる。自社への導入には小型中性子線源を用いた計測システムが必要である。そのため、小型中性子線源とそれに伴う周辺要素にビジネスチャンスがある。要素には、中性子線源、検出器、解析装置、ソフト、施設の設置(遮蔽を含む)、運転、管理などが考えられる。

設問5まとめ 必要な変化

15年後に中性子線産業利用がビジネスとして成功するには、9名全員が中性子線源、検出器などのシーズの開発が必要としていた。5名が使いたい時に使える中性子線源、2名が大型施設の大強度化であった。検出器、計測手法については2名、源と検出器両方にかかる新し

い技術で1名が必要と回答していた。

中性子ビジネスを成り立たせるにはシーズの開発は必須であるといえる。

設問6まとめ 競合技術

15年後の私たち(弊社、所属先企業)の一番のライバルは、効率よく開発が行える環境にある放射線検出器メーカー(国内外)である。効率よく開発を行うための環境には中性子線利用に詳しい、中性子線源の保有がある。

検出器については、検出部だけでなく、信号の読み出し、ソフトなどを含めて総合的に優れたものを選ばれる。

新規抗がん剤が開発されるとがん治療自体の必要性がなくなるかもしれないとの回答があった。同様に、他の計測手法の技術が発達し中性子の利用のメリットがなくなると検出器の必要性がなくなる可能性がある。

設問7まとめ 乗り越える壁

中性子線産業利用のために乗り越える壁(制約)について、法規制が5名、コストが4名、技術課題4名(中性子源2名、測定方法2名)、人材育成2名、認知度向上、構成品の放射化・廃棄物処理問題、秘匿性が各1名であり、法規制、コスト、技術が同程度に高い結果であった。コストが高くなる理由として、中性子源のコストが高いこともあるが、安全のための遮蔽設備にもコストがかかる。

中性子線の産業応用が拡大するには、中性子線の強度を高めることも重要であるが、いかに少ない中性子線で目的の計測を行うかも重要となる。

調査のまとめ

調査機関への調査依頼、中性子の専門家である大学・公的研究機関及び企業内研究者9名を対象にインタビュー及びアンケート調査、報告会等での情報集を行った結果、中性子線利用の今後の展開について以下の特徴が認められた。

中性子線利用の今後の特徴

既存の手法では解決できなかった課題を持つ人が中性子線を利用

中性子線を利用したいと感じる人は、物質について新たな知見を得るために光、電子、X線などの従来の手法ではわからなかったことを明らかにしたい人たちである。わからなかったことには、材料の構造、軽元素、磁性、内部、深部の情報や、製品が動作している

状態での内部の観察などがある。

現状は、わからなかったことがあったとしても、中性子を知らない(認知度が低い)ために、それを利用したいと感じていない。まずは中性子線そのものを知ってもらう(認知度を高める)必要がある。

中性子線利用分野の現状

中性子線に関する情報収集時、開催される会への参加者は同じ研究者が多く、互いに情報を共有していた。研究はクローズドなコミュニティーで行ってきたといえる。これは、中性子線研究を限られた利用場所、利用機会で行い、助成金により共同開発を行ってきたからだと考えられる。

中性子線利用の現状は、コストが高い、技術課題が多い、利用場所が限定、研究者および利用者が少ない、ニーズが開拓できていないなど多くの課題があり、研究段階である。

中性子線利用分野は学術、医療、産業利用の3つの分野

アンケートから、15-20年後、中性子線は大きく3つの分野で利用されていると考えられる。1つは、学術研究分野で、大強度の中性子や放射光を用いて未開拓領域の研究に利用される。2つ目は、医療分野で、正常な組織は破壊せずがん細胞だけを死滅させるがん治療 BNCT に利用され、治療が日本各地で行われている。3つ目は、産業利用分野で、企業が製品の開発、検査時などにいつでも利用できる環境が整っている。

学術研究分野では、15-20年後、大強度の中性子線により新しい実験手法が開発され、未開拓領域の研究が進められている。大強度中性子線計測で得られたデータは、多様で広範囲な情報を必要とする AI 技術、ビッグデータ社会にも有用なものとなり、放射光や計算科学との連携活用により新たな付加価値が生まれている。一方で、本当は J-PARC のような大強度中性子線の大型施設を複数揃えて成果を増やしたいが、膨大なコストがかかるため、性能の高いものとある程度の性能で低コストなものを揃えることで成果を増やしている。ある程度の性能で低コストなものとは小型の中性子線源であり、それを大学などの複数の研究機関に導入し人材育成や学術成果を出している。

医療分野では、15-20年後、BNCT が医療の承認が下り、治療施設が増えて各地で治療が行われている。がん治療においては、BNCT は、X 線、重粒子など既存の放射線治療とは差別化され、その強みを活かした治療を展開している。技術においては中性子線源の安定性や強度を上げて治療時間を短縮するなど、より患者にやさしいがん治療を目指し改善が

行われている。

産業応用分野では、15-20年後、小型中性子線源を利用した施設設置や、大型施設の計測時間の短縮などにより、企業が中性子線を新規材料開発や新製品開発時の開発ツール、製品の不良解析ツールに日常的に利用している。中性子による計測は、電子線やX線などのプローブによる解析が困難な軽元素、磁性などの解析で差別化されている。また、新しい計測技術の開発により弱い強度の中性子線でも解析が行えるようになることで、民間企業への導入も可能となっている。

上述は好意的な観測の未来である。それを実現するために必要な変化や乗り越えるべき課題がある。それが行われないと、中性子線の利用は学術研究分野での利用のみ限定されたものとなり、産業利用へは拡大しない。

中性子線利用の拡大に必要な変化

アンケートから各利用分野での重要となる変化は以下である。

学術研究分野における変化は、J-PARCの最高出力運転による中性子線の大強度化、検出装置の高度化である。最高出力運転により中性子線強度が増加する。それに伴い、「新しい中性子線実験が実用化され、放射光実験との差別化が期待される」と回答している。

新しい中性子線実験の実用化のためには、J-PARCの「大強度化」とX線など「他の手法に負けないよう常に新しい技術の導入」が必要としている。

医療分野における変化は、「エックス線治療では治療できない部位に積極的に適応拡大する」である。そのために、「安定、安全、安く、大強度な小型加速器型中性子線源の開発」や薬剤の開発が必要なる。中性子線源、薬剤の開発により患者に負担のかからない治療が期待される。

産業応用分野の変化は、中性子線を利用できる場所が増え、その利用が身近になる環境が整うである。「港・空港」、「創薬系ラボ」、「大学の研究室」、「中性子源1台に複数のビームライン」、「各地方拠点に」、「民間への導入」など調査者9人中8人が、15-20年後には大型施設や原子炉以外で中性子線が利用できる環境になっていくと回答している。

また、人材を育成し中性子の認知度を高めることも重要である。「施設ができて、それを運用、活用する人がいないと、その分野は発展しないと考えられる」とある。そのため、大学などの研究機関にもある程度の性能があり低コストな中性子源を導入し、装置やデータを扱える人を増やし人材を育成する。人材が増えることで、研究の量や質が向上し、学術成果が増えていくと考えられる。こうして、中性子線の認知度が高まると中性子のトラ

リアルユーザーが増え、事例が増えると欲しいとするユーザーが増え情報が蓄積される。情報が増えることで計測に付随する機器が高度化されていく。

つまり、現在中性子線利用分野では、中性子線源、検出器の開発であるモノ、研究者、利用者であるヒト、コストであるカネにおいて多くの課題を抱えている。

中性子利用におけるビジネス

各利用分野におけるビジネスの機会は以下のように考えられる。

学術研究分野におけるビジネス

- ・ J-PARC の大強度化のための技術開発
- ・ X線など「他の手法に負けないよう常に新しい技術」の提供
- ・ 「 ^3He がなくなる」への対応(代替検出器製造)
- ・ 人材育成

医療分野におけるビジネス

- ・ 「加速器中性子線源そのもの」の製造
- ・ 「治療に付随する要素、例えば線量計や、治療計画装置、照射台、などの製造」
- ・ 人材育成

産業利用分野におけるビジネス

- ・ 「小型中性子線源」の製造、設置、運転、維持
- ・ 「 ^3He がなくなる」への対応(検出器製造)
- ・ 「管理区域が不要なまでフラックスを低減し、可動できる検査・分析できる技術の開発」
- ・ 装置の低コスト化
- ・ 「小型中性子線源を利用した解析ビジネス」
- ・ 人材育成

どの利用分野でも技術開発を必要としているためビジネスチャンスがある。技術だけでなく計測サービス、施設管理、人材育成等などにもビジネスチャンスがある。

業績目録

論文(査読有 筆頭)

- [1] Haruyasu KONDO, Hiroyuki SUGIYAMA, Masahiro HAYASHI, Teruyuki OKADA, Fuyuki TOKANAI, Ryutaro ITO, Satoshi ISHIZAWA, Yuichiro INOMATA, Kento SUZUKI, Seiji TASAKI, Masanori HIROSE, Masahiro HINO, Ryohei HANAYAMA, Takayuki SUMIYOSHI, “Development of a Sealed-Type Capillary Plate Gas Detector for Thermal Neutron Imaging”, *Plasma and Fusion Research*, 13(2018): 2406018
- [2] (主論文)Haruyasu Kondo, Hiroyuki Sugiyama, Teruyuki Okada, Masahiro Hayashi, Toru Moriya, Satoshi Ishizawa, Fuyuki Tokanai, Ryohei Hanayama, Masahiro Hino, Seiji Tasaki, Masanori Hirose, Takayuki Sumiyoshi, “Neutron Gas Scintillation Imager with Glass Capillary Plate”, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A* 958 (2020): 162804

論文(査読有 共著)

- [1] Hiroyuki Sugiyama, Haruyasu Kondo, Takayuki Sumiyoshi, Fuyuki Tokanai, “Gas Scintillation Imager with Glass Capillary Plate”, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (投稿中)
- [2] 住吉 孝行, 門叶 冬樹, 近藤 治靖, “細孔型 MPGD を用いた中性子イメージング検出器の開発”, *波紋*, 27.1(2017): 16-19

国際学会抄録(筆頭)

- [1] Haruyasu KONDO, Hiroyuki SUGIYAMA, Masahiro HAYASHI, Teruyuki OKADA, Fuyuki TOKANAI, Ryutaro ITO, Satoshi ISHIZAWA, Yuichiro INOMATA, Kento SUZUKI, Seiji TASAKI, Masanori HIROSE, Masahiro HINO, Ryohei HANAYAMA, Takayuki SUMIYOSHI, “Development of a Sealed-Type Capillary Plate Gas Detector for Thermal Neutron Imaging”, *CLES/LANSA'17*

国際学会抄録(共著)

- [1] Ryutaro ITO, Haruyasu KONDO, Hiroyuki SUGIYAMA, Masahiro HAYASHI, Teruyuki OKADA, Fuyuki TOKANAI, Satoshi ISHIZAWA, YUICHIRO Inomata, KENTO Suzuki, Seiji TASAKI, Masanori HIROSE, Masahiro HINO, Shunji KISHIMOTO, Takayuki SUMIYOSHI, “Neutron Imager with Glass Capillary Plate”, *NDIP2017*.
- [2] Ryutaro ITO, Haruyasu KONDO, Hiroyuki SUGIYAMA, Masahiro HAYASHI, Teruyuki OKADA, Fuyuki TOKANAI, Satoshi ISHIZAWA, Seiji TASAKI, Masanori HIROSE, Masahiro HINO, Shunji KISHIMOTO, Takayuki SUMIYOSHI, “Development of neutron imaging detector with glass capillary”, *ISR2019*.
- [3] Toru Moriya, Haruyasu Kondo, Hiroyuki Sugiyama, Teruyuki Okada, Masahiro Hayashi, Satoshi Ishizawa, Fuyuki Tokanai, Ryohei Hanayama, Masahiro Hino, Seiji Tasaki, Masanori Hirose, Takayuki Sumiyoshi, “Neutron Gas Scintillation Imager with Glass Capillary Plate”, *VCI2019*
- [4] Hiroyuki Sugiyama, Haruyasu Kondo, Takayuki Sumiyoshi, Fuyuki Tokanai, “Gas

国内学会発表

- [1] 近藤治靖, 杉山浩之, 岡田晃行, 林雅宏, 門叶冬樹, 猪俣雄一郎, 伊藤龍太郎, 石澤倫, 住吉孝行, “キャピラリープレートを用いた封じ切り型 MPGD の開発”, 第 13 回 MPGD 研究会
- [2] 近藤治靖, 杉山浩之, 岡田晃行, 門叶冬樹, 森谷透, 日野正裕, 住吉孝行, “キャピラリープレートを用いた高空間分解能中性子ガスシンチレータの開発”, 日本中性子科学会 第 18 回年会

特許

- [1] 特開 2018 - 128384, 「比例計数管及び中性子撮像システム」,
発明者 近藤治靖, 杉山浩之, 林雅宏, 岡田晃行, 門叶冬樹, 住吉孝行