

JAERI-Research
2005-010



JP0550145



個別読み出し型二次元中性子ガス検出器の開発
—中性子ビームによる動作試験と検出システムの構築—

2005年4月

田中 浩基・山岸 秀志・中村 龍也・曾山 和彦・相澤 一也

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

個別読み出し型二次元中性子ガス検出器の開発
— 中性子ビームによる動作試験と検出システムの構築 —

日本原子力研究所東海研究所中性子利用研究センター
田中 浩基^{*}・山岸 秀志・中村 龍也・曾山 和彦・相澤 一也

(2005年 2月 9日受理)

大強度パルス中性子源を用いた中性子散乱実験用次世代中性子検出器として個別読み出し型中性子ガス検出器の開発を行った。本検出システムでは分光器毎に異なる要求性能(計数率、効率、 n/γ 比、位置分解能、大面積化等)に対して検出素子を適切に選択することで柔軟に対応することが可能である。検出素子として MWPC を用いた場合の本システムの中性子検出器基礎特性及び二次元イメージングの性能試験を行った。ガス条件を 5 atm ^4He 30% C_2H_6 (0.26 atm ^3He)としたときにガスゲイン 450 で長時間安定に動作し、中性子ビームサイズを考慮した位置分解能は陰極及びバックストリップの方向で 1.4、1.6 mm(FWHM)であった。また検出素子の有感領域内における検出効率の均一性は最適アンプ閾値において良好であることを確認した。

Development of 2-d Position-sensitive Neutron Detector
with Individual Readout
— Operation Test and Establishment of Detection System
by Means of Neutron Beam —

Hiroki TANAKA[※], Hideshi YAMAGISHI, Tatsuya NAKAMURA,
Kazuhiko SOYAMA and Kazuya AIZAWA

Neutron Science Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 9, 2005)

We have been developing the 2-d position-sensitive neutron detector with individual readout as next-generation-type detector system for neutron scattering experiments using intense pulsed neutron source. The detection system is designed to fulfill the specifications required for each neutron spectrometer, such as a count rate, efficiency, neutron/gamma-ray ratio, a spatial resolution and a size, by using suitable detector heads. The fundamental and imaging performances of the developed system assembled with a Multi-wire proportional counter head were evaluated using a collimated neutron beam. The system worked stably for long hours at the ^4He gas pressure of 5 atm with a mixture of 30% C_2H_6 (0.26 atm ^3He) at gas gain of 450. The spatial resolutions were 1.4, 1.6 mm (FWHM) for a cathode- and a back strip- direction, respectively, considering a beam size. It was also confirmed that the spatial uniformity of the detection efficiency over the whole sensitive detection area was rather good, $\pm 8\%$ deviation from the average with the optimum discrimination level.

Keywords: Multi Wire Proportional Counter, Helium-3, 2-d Neutron Detector, Individual Readout, Spatial Resolution

※ Post-Doctoral Fellow

目次

1. 序論	1
2. 二次元位置敏感型中性子検出器	1
2.1 ガス中性子検出器	3
2.2 シンチレーション中性子検出器	3
3. 個別読み出し型二次元中性子ガス検出器	4
3.1 検出素子と圧力容器	4
3.2 エンコーダ装置とデータ表示	5
4. 個別読み出し型検出器による原子炉ビーム実験	8
4.1 基礎特性試験	8
4.1.1 中性子ビーム	8
4.1.2 ガスゲイン測定	9
4.1.3 陰極及びカソードストリップの波高分布	11
4.1.4 均一性の測定	11
4.2 位置分解能の測定	12
5. 結論	16
謝辞	16
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. 2-d Position Sensitive Neutron Detector	1
2.1 Gaseous Neutron Detector	3
2.2 Scintillation Neutron Detector	3
3. 2-d Position Sensitive Neutron Gaseous Detector with Individual Readout ...	4
3.1 Detection Element and Pressure Vessel	4
3.2 Encoder Device and Data Display	5
4. Reactor Neutron Beam Experiment Using Individual Readout Detector	8
4.1 Fundamental Test	8
4.1.1 Neutron Beam	8
4.1.2 Gas Gain Measurement	9
4.1.3 Pulse Height Distribution of Cathode and Back Strip	11
4.1.4 Uniformity Measurement	11
4.2 Spatial Resolution Measurement	12
5. Conclusion	16
Acknowledgement	16
References	16

1 序論

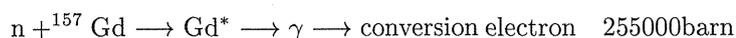
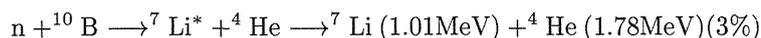
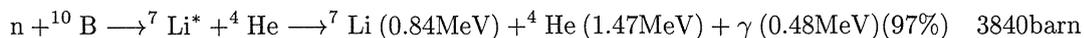
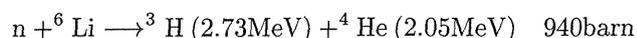
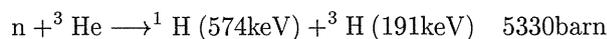
現在、日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構の共同プロジェクトとして大強度陽子加速器計画が進行中である。物質・生命科学研究分野では、3 GeV のエネルギーを持った陽子を水銀ターゲットに入射し核破砕反応の結果発生する大強度パルス中性子を使った中性子散乱実験が行われる。これにより物質の機能・特性・構造の解明、構造生物学、物質の表面・界面の構造、中性子イメージング等の研究が飛躍的に向上すると期待される。

米国においても同様に Spallation Neutron Source(SNS) 計画としてオークリッジ国立研究所内に2006年完成予定として大強度パルス中性子源が建設中である。現在、英国ラザフォードアップルトン研究所の ISIS 中性子散乱実験施設にあるパルス中性子源が出力0.16 MW と世界最高であるが、日本、米国に建設されているパルス中性子源は1 MW 級の出力がある。

これらの大強度パルス中性子源を用いた中性子散乱実験においては新しいサイエンスが展開されるが、各分光器によって検出器に要求される性能は異なる。Table.1 に SNS における各分光器で必要となる検出器の性能を挙げた [1]。現在原子炉の中性子散乱実験施設で使われているような既存の中性子検出器では表にあるような性能の全てを満たすことは出来ない。また、高計数率、大面積、高 n/γ 比、高検出効率、高位置分解能といった性能を全て有する検出器は現在のところ存在しないことから、分光器毎に異なる性能に適合した検出器を開発する必要がある。このため我々は個別読み出し型二次元中性子ガス検出器システムの開発を行っている。本検出システムでは検出素子の各チャンネルを個別に高速読み出しすることを特徴としており、適切な検出素子を選択することで異なる要求性能に柔軟に対応できる。本稿では Multi Wire Proportional Chamber(MWPC) 検出素子を用いて構築した個別読み出し型二次元中性子ガス検出器システムの性能試験結果を報告する。

2 二次元位置敏感型中性子検出器

現在中性子散乱実験で用いられている中性子検出器は大きく二つに分類される。一つはガスを用いた方法でもう一つはシンチレータを用いた方法である。いずれの検出器においても中性子は電荷を持たず他の物質とクーロン相互作用を起こさないため荷電粒子へのコンバータが必要となる。代表的なコンバータ (^3He , ^6Li , ^{10}B , ^{157}Gd) と中性子の核反応を以下に示す。



一般にガス検出器は検出効率、 n/γ 比、安定性に優れており、シンチレーション検出器は計数率、位置分解能、大面積化に優れている。次にそれぞれの検出器の特徴について述べる。

Table. 1 SNS detector requirement

Instrument	Number Pixel	Pixel area (cm ²)	Maximum neutron energy(eV)	Neutron capture efficiency(%)	Gamma efficiency	Time resolution (μs)	Peak pixel count rate(ns ⁻¹)	Detector count rate(ns ⁻¹)	Data transfer rate(Mbs ⁻¹)
Powder diffractometer	40,000	2.4	0.33	50	10 ⁻⁶	1	100	3.5×10 ⁶	28
Disordered material diffractometer	150,000	0.25	35	20	10 ⁻⁶	1	300	4.2×10 ⁷	340
High pressure diffractometer	100,000	0.02	0.5	50	10 ⁻⁷	1	1×10 ⁴	3.0×10 ⁵	2.4
Engineering diffractometer	80,000	1.25	0.15	50	10 ⁻⁶	1	2×10 ⁵	2.4×10 ⁶	20
Single-crystal diffractometer	5×10 ⁶	0.01	0.35	50	10 ⁻⁶	10	2×10 ⁴	3.0×10 ⁵	2.4
Small angle diffractometer	40,000	0.25	0.08	50	10 ⁻⁷	10	1,500	2.0×10 ⁷	160
Liquids reflectometer	40,000	0.01	0.02	50	10 ⁻⁷	10	1×10 ⁶	7.0×10 ⁷	560
Magnetism reflectometer	40,000	0.01	0.03	50	10 ⁻⁷	10	1×10 ⁶	9.0×10 ⁷	720
Back scattering spectrometer	4,500	1.3	0.01	50	10 ⁻⁶	1	1×10 ⁴	1.3×10 ⁵	1
Wide angle spectrometer	70,000	2.5	1	50	10 ⁻⁷	1	1×10 ⁶ (Bragg)	5.0×10 ⁵	4
Cold neutron spectrometer	15,000	6.3	0.05	50	10 ⁻⁷	4	1×10 ⁶ (Bragg)	5.0×10 ⁶	56
High resolution spectrometer	70,000	2.5	1	50	10 ⁻⁷	1	1×10 ⁶ (Bragg)	4.0×10 ⁵	3.2

2.1 ガス中性子検出器

ガス検出器には ^3He 、 $^{10}\text{BF}_3$ ガスを使用したものと ^{157}Gd や ^6Li 固体コンバータを使った手法がある。 ^3He 、 $^{10}\text{BF}_3$ ガスコンバータは検出器の有感体積中で中性子を直接捕獲し、プロトン、トリトン、 α 粒子といった荷電粒子を生成する。その荷電粒子がコンバータガスを電離し電荷情報を生成するので良好なエネルギー情報を有する。一方固体コンバータを使用した場合、固体コンバータ内で生成した荷電粒子はコンバータ内から放出するまでエネルギーを損失してしまうのでエネルギースペクトルは連続となってしまう。良いエネルギー分解能を得るためには固体コンバータを薄膜にする必要があるが、検出効率の低下に繋がるのであまり好ましくない。また γ 線イベントとの弁別が難しくなってしまうという欠点もある。しかしながら一般的に良く用いられているP-10 ガスなどの電離ガスを自由に選択できるというメリットもある。現在実用化され中性子散乱分光器に搭載されているガス検出器は ^3He 比例計数管、抵抗分割型 ^3He 比例計数管、遅延時間型 ^3He 比例計数管、マルチワイヤ比例計数管等がある。抵抗分割型、遅延時間型はそれぞれ電極での収集電荷もしくは信号パルスの立ち上がり時間をワイヤの両側で検出し、その比を位置の情報に変換する方法である。一般に高速性は遅延時間型の方が優れている。ガス中で電離された電子が陽極方向にドリフトして、陽極近傍でガス増幅を起こすことにより位置信号が得られるが、電荷収集時間がイベント処理時間となるために計数率は $10^4 \sim 10^5$ オーダーになる。これ以上の計数率では芯線近傍での空間電荷効果により電界の低下を生み、出力信号が低下して計数比例性を失う。多大な中性子ビームの入射により計数率が上がると窒息現象や直径 $10\mu\text{m}$ 程度の芯線に過電流が流れ、切断することもあり注意が必要である。

マルチワイヤ比例計数管の位置検出分解能及び計数率特性を改善するために仏国のOed[2]らによってMSGC(Micro Strip Gas Chamber)の開発が行われてきた。MSGCはガラス等の絶縁体の上に半導体リソグラフィ技術を用いてアノードとカソードの電極を配置できる結果、その間隔を数 $10\mu\text{m}$ と狭くすることができ、高位置分解能の実現が可能となる。また信号となる電離電荷を高速で処理することができるので、 10^4 cps/mm 2 オーダーの計数率で信号処理できる。MSGCはもともと仏国のInstitut Laue-Langevin(ILL) 研究所において原子炉における中性子散乱実験用として10年以上研究が進められてきた。またX線散乱実験施設においても実績がある[3]。しかしながらいくつかの問題を抱えており、例えば絶縁体上への電荷蓄積や電極間放電によるストリップ破断などが挙げられる。中性子検出においては核反応の結果生成する二次荷電粒子のエネルギーは ^3He ガスの場合765 keVと非常に大きいのでガス圧を上げて飛程を短くし位置分解能の向上を図るが、一方ではガスゲインの低下によりS/Nが劣化してしまう。そのため原研では飛程と軌跡に沿ったエネルギー分布が異なることを利用して、粒子弁別を行うことでガス条件とは無関係に高位置分解能を得る手法についての研究開発も行っている[4, 5, 6]。

2.2 シンチレーション中性子検出器

シンチレーション検出器では一般にコンバータで生成される荷電粒子がシンチレータ中の活性化物質を励起しそれが基底状態に遷移する際に放出される蛍光を光電子増倍管で電気信号に変換し中性子を検出する。一般に中性子用シンチレータとしては ^6Li ガラスやZnSと ^6LiF の組み合

わせが使用される。一つの中性子の入射に対して ${}^6\text{Li}$ ガラス及び $\text{ZnS}+{}^6\text{LiF}$ の光子数はそれぞれおおよそ 7000 及び 160000 である。 ${}^6\text{Li}$ ガラスは蛍光寿命が 50-70 ns と短いため多くの研究がなされたが蛍光出力が小さく γ 線感度が高いため一般の分光器用として適さない。一方、 ZnS と ${}^6\text{LiF}$ の組み合わせは高い蛍光出力、低い γ 線感度から汎用分光器用として採用されている。

シンチレーション検出器にはいくつかの読み取り方法が考案されていて、代表的なものには光ファイバをもちいたエンコード方式、波長変換ファイバを用いた方式、直接読み出し型方式などがある。エンコード方式は実際に ISIS 実験施設では実機として動作している [7]。原理は細分化されたシンチレータにそれぞれ光ファイバが結合されており、光電子増倍管の数を減らすために 1 ピクセルのシンチレータから二つの光ファイバを出し、それを異なる光電子増倍管に結合するという組み合わせエンコード方式である。波長変換ファイバ方式は 0.5 mm 厚さのシンチレータの上下面に 0.5 mm 角の光ファイバを直交して並べ、それぞれの中性子入射位置で発光した光を光電子増倍管に入力することで位置を決定する方法である [8]。直接読み取り方式は薄いシンチレータを抵抗分割型光電子増倍管の入射面に直接結合し位置情報を得ることができる [9]。エンコード方式は 3-5mm の位置分解能を有し、1 Å の波長の中性子に対する検出効率は 20 % である。一方波長変換ファイバ方式は 0.5mm のファイバを用いているため位置分解能が 0.5 mm 程度と非常に良い。しかしながら熱中性子に対する検出効率が 30 % 程度と低いため効率を上げる工夫が必要になると考えられる。それには ZnS シンチレータの蛍光出力を向上するための材料の改良、もしくはフォトンカウンティングといった手法により効率を向上させるための研究が行われている [10]。直接読み取り方式は位置分解能 0.5mm 検出効率 50 % と比較的よいが、光電子増倍管の位置決定を抵抗分割で行っているため、その処理時間から計数率は数十 keps となる。また中性子ビームがダイレクトに入射する環境などでは光電子増倍管の回路を損傷することも考えられる。

このように中性子検出器の性能にはトレードオフがありすべてを満たす検出器は存在しない。したがって設置する分光器の特徴や目的とするサイエンスに適した検出器システムとする必要がある。

3 個別読み出し型二次元中性子ガス検出器

我々が開発を行っている検出器システムは 3 つの部分に分けられる。一つは MWPC 等の検出素子を装着する耐圧 10 atm の圧力容器、次に中性子が入射した位置を決定するためのエンコード装置、最後にデータ表示するための計測装置からなる。Fig.1 に厚さ 5 mm の入射窓を有するアルミ製フランジを取り外した状態の圧力容器の写真を示す。内径 154 mm のステンレスフランジの内部に G-10 製柱を四隅に配置し、ドリフトプレートと検出素子までの距離を 25 mm とした。

3.1 検出素子と圧力容器

Fig.2 に個別読み出し型 MWPC の概略図を示す。この検出器はドリフトプレート、陽極、陰極、バックストリップから構成されている。陽極は 1 mm 間隔、直径 20 μm タングステンワイヤが 40 本 G-10 フレームにはんだつけされており、陽極から 1.2 mm 下方の位置に 1 mm 間隔で陰極が設置されている。それぞれの陰極からの信号は 541 チャンネル個別読み出し信号フィードスルーを通して

マザーボードに入力される。マザーボードには4枚のアンプ基板が挿入されている。1枚のアンプ基板には4チャンネル分の信号を処理できるアンプ、ディスクリ及びLVDS出力回路が組み込まれた ASD-ASIC(12 mm 角×2.5 mm 高さ)が16個実装されている。4枚の基板で合計128+128チャンネルの信号を処理することができる。

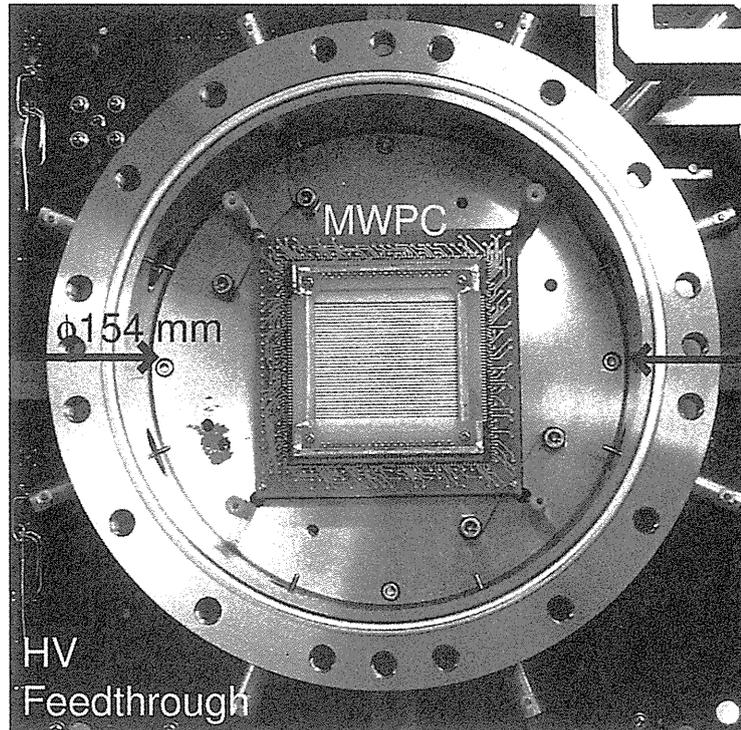


Fig. 1 Picture of the internal pressure vessel with MWPC

3.2 エンコーダ装置とデータ表示

中性子と ^3He の核反応の結果プロトンとトリトンが生成しそれらの軌跡に沿って電離電子が生成される。その電離電子は陽極に向かってドリフトし陽極近傍でガス増幅を起こす。ガス条件、言い換えるとプロトンとトリトンの飛程、に依存していくつかの陰極及びバックストリップに信号が誘導される。アンプ基板の積分時定数は80nsで高速対応しておりパイルアップ事象を回避できる。陰極及びバックストリップからのアンプ出力波形と陽極に接続した電荷有感型増幅器の波形をFig.3に示す。

誘導された信号の大きさが設定した閾値よりも大きな波高を持つ陰極またはバックストリップからの信号はLVDSデジタル信号に変換され68pinケーブルを通過してエンコーダ装置へ入力される。閾値を変化させた時の出力信号の波高値とLVDS信号の信号幅の関係をFig.4に示す。X軸の波高値はメインアンプ前の値を示しており、メインアンプのゲインは25倍である。●、○及び×はそれぞれ閾値を4、6及び8 mVに変化させたときの出力信号とLVDS信号幅の関係であり、閾値を

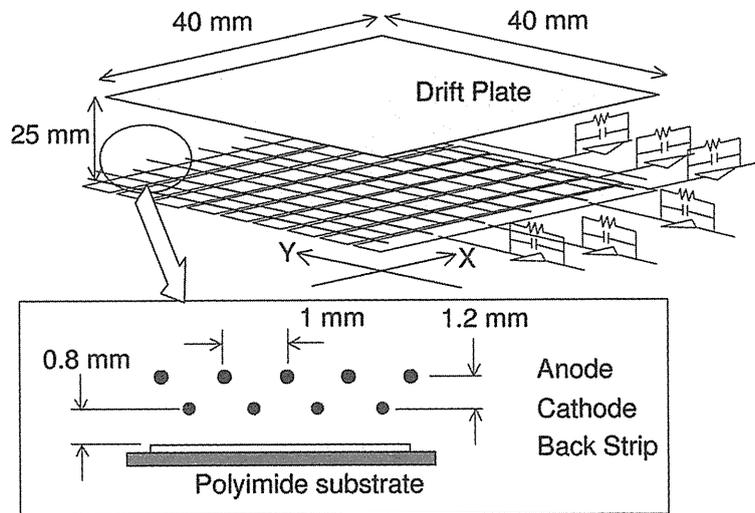


Fig. 2 Schematic layout of the developed neutron detector with individual readout

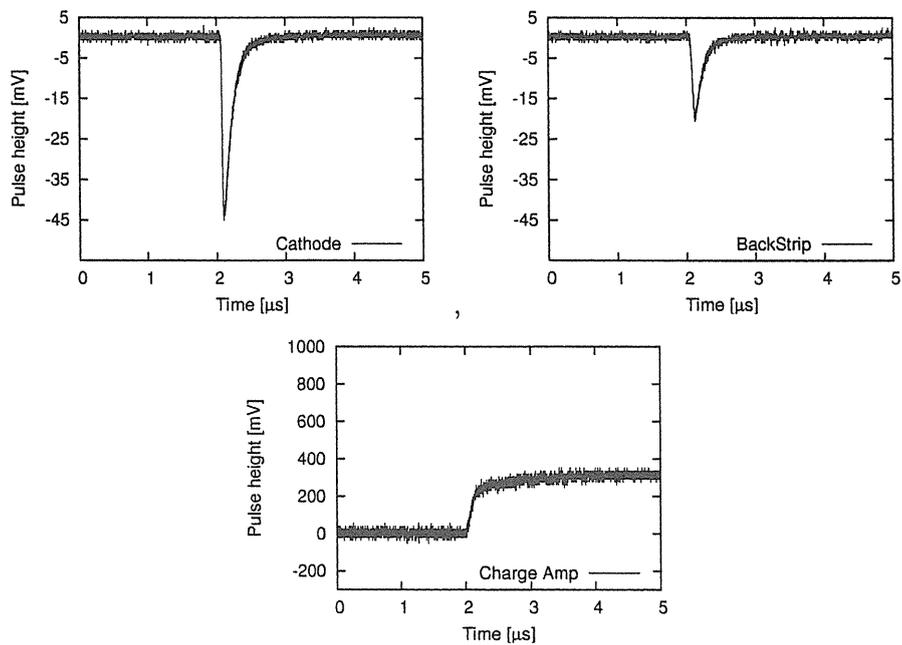


Fig. 3 Typical pulse shapes of a cathode, back strip and charge amplifier

低くするに従って、またアンプからの信号波高値が大きくなるほどLVDS信号幅は広くなる。最大でも130 ns幅であり、高速信号処理には十分狭い値である。閾値は実験ごとにガス条件から派生する印加電圧によって決定される波高分布から、S/Nと検出効率を考慮にいて最適な値を設定する必要がある。

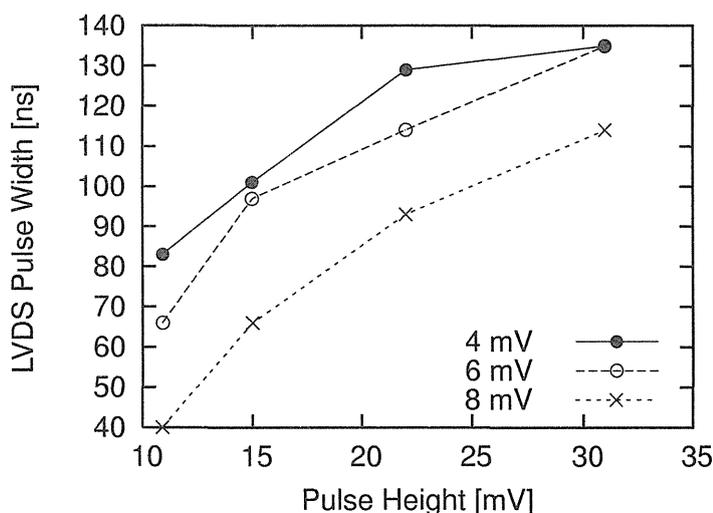


Fig. 4 LVDS pulse width as a function of amplifier pulse height when the discrimination level was changed.

エンコーダはフィールドプログラマブルアレイ (Field Programmable Gate Array:FPGA) で構成されており、電源を切ってもプログラムが保存される PROM 型のもを使用した。Fig.5にあるように、陰極及びバックストリップからの信号はそれぞれ FPGA1 及び FPGA2(XCV1000E:XILINX 社製) で信号処理される。FPGA1、2はアンプ基板からの LVDS 信号を内部に組み込まれた LVDS ドライバで受け取り、ロジック信号として処理する。エンコードのプログラムの手順としては、一つのイベントで一番早く入ってきた信号をトリガーとしてゲート信号を生成する。ゲート信号幅はエンコードボードが持つクロック数(ここでは 20 MHz、クロック幅 50 ns)×任意整数で設定することができる。ここでは MHz オーダーのイベントに対応できるように任意整数を 12 としゲート幅を 600 ns とした。ヒットしたチャンネルはゲートが終わるまでラッチをかけており、プロトンとトリトンの飛跡に沿った電離電子がガス中をドリフトする時間を考慮して、初めにヒットしたところから 100ns 経たところで一番高い Bit(X_{high} , Y_{high}) と低い Bit(X_{low} , Y_{low}) を決定するプログラムとした。

また、イベントによっては連続して中性子が入射してくることがあり、その場合見かけ上プロトン、トリトンの飛程が長くなるように見える。また放電、偶発的な電気ノイズなどが存在するとこれもヒットされたかのようにみなされるので、飛程よりも長いイベントは排除するプログラムとした。次に FPGA1 及び 2 からの X_{high} , X_{low} , Y_{high} , Y_{low} は FPGA3(XCV400E:XILINX 社製) へと送られ、位置演算・データ表示装置の MPA-3(Fast Comtec 社製) とのハンドシェイクを行う。この際 MPA-3 の入力仕様は TTL 信号となっているので FPGA からの LVDS 信号は TTL 信号へと変換して信号処理している。Fig.5 の様に、信号が入ったと同時に Dead Time 信号を出し、ゲート信号が終わってから 200ns 後に MPA-3 へ Data Ready 信号とヒットした両端のチャンネル位置を送り、MPA-3

からは Data Accept 信号をエンコーダ装置へ返し、一つのイベントの処理が終了する。ゲート信号幅の設定値にも依存するが一つのイベントが終了するのに今回は 800 ns であった。

MPA-3 では受け取ったプロトンとトリトンの軌跡の両端のビットの間を取る演算を行い、そのヒットチャンネルをヒストグラム化し、ディスプレイに表示する。本システムはパルス中性子源実験で必要となる二次元 TOF 測定にも対応している。

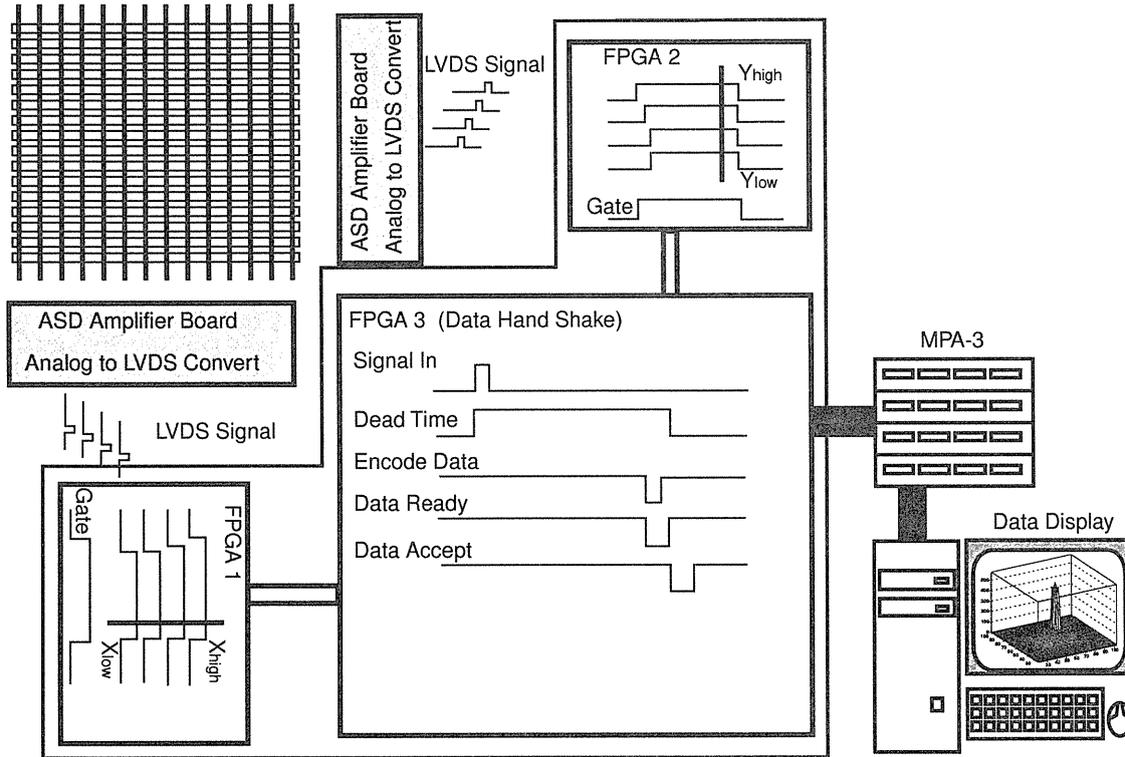


Fig. 5 Schematic layout of the developed encoder system

4 個別読み出し型検出器による原子炉ビーム実験

4.1 基礎特性試験

4.1.1 中性子ビーム

実験は JRR-3 ビームホール内反射率ポートで行った。Fig.6 に実験配置図を示す。炉心及び減速材からの中性子ビームのライン上に設置されたモノクロメータ (pyrolytic graphite) によって 3.9 \AA の中性子ビームが遮蔽体のビーム窓から外へ取り出される。平行ビームを作るために遮蔽体窓から出てきた中性子ビームを厚さ 10 mm、直径 13.5 mm の B_4C ゴム板、下流の 80 mm 離れた所に 2 mm 間隔の Cd スリットをさらに下流の 380 mm 離れた位置にビームを整形するための Cd コリメータを設置した。設置する際、ビーム強度が最大になるようにモニタしながら軸合わせを行った。Cd コリメータから検出器の入射窓までの距離は 30 mm としたところ、中性子束は $3.9 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。

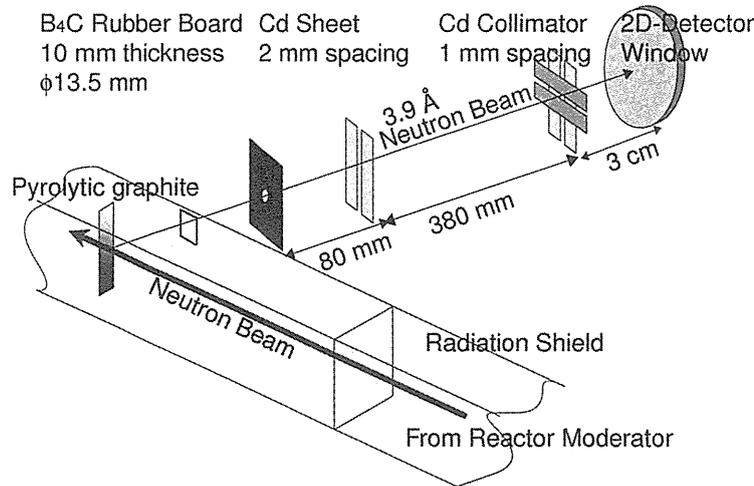


Fig. 6 Experimental view of neutron beam collimator system

4.1.2 ガスゲイン測定

中性子散乱実験では高位置分解能、高効率、高 n/γ 比、高計数率といった性能とは別に長時間安定に動作することが望まれる。ガス検出器は比較的安定な動作をすることが知られているが個々の検出器によって特性を持っているため、最適化を行う必要がある。位置分解能を上げるためにはプロトン、トリトンの飛程を短くする必要があり全圧を上げるか、ストッピングガスの分圧を上げることが不可欠である。そうするとガスゲインが低下してしまうのでより高い印加電圧が必要となる。また検出効率を上げるために全体のガス圧を上げると、同様に高い印加電圧が必要となる。高圧での動作は振動等といった突発的な事象に非常に敏感になり放電破壊の原因となる。すなわちガス条件によって性能が変化するといっても過言ではない。

ガスゲインを測定するため4.1.1小節で述べた中性子ビームを検出器中央に照射した。測定回路は陽極に接続した電荷有感型増幅器 (Ortec142PC) からの出力を波形整形アンプ (Ortec450) に入力し、整形アンプからの出力をADC (Fast Comtec:7072T) に入力し、MPA-3と計算機でデータ収集、表示を行った。このときの整形アンプの時定数は $0.25 \mu\text{s}$ とし、陽極に印加する電圧を変化させながら波高分布のピーク値を読み取った。ガス条件は4 atm 20 % C_2H_6 、5 atm 30 % C_2H_6 、6 atm 30 % C_2H_6 とした。代表的な波高分布をFig.7に示す。プラトー領域の波高分布のピーク値を1としたときの各電圧でのピーク値をガスゲインとした。結果をFig.8に示す。またこのガス条件でのプロトン及びトリトンの飛程を計算コード (Stopping and Range of Ion in Matter:SRIM) から計算した結果をFig.9に示す。プロトンとトリトンの全飛程はガス条件4 atm 20 % C_2H_6 、5 atm 30 % C_2H_6 、6 atm 30 % C_2H_6 の時にそれぞれ、6.1、3.7、3.1 mmであった。飛程のみを考慮すると当然、6 atm 30 % C_2H_6 のガス条件が最適であるが、Fig.8にあるように高いガスゲインを得るためにはより高い印加電圧が必要になる。今回は、良好な動作を確認している5 atm 30 % C_2H_6 のガス条件にて、陽極への印加電圧2300 V、ガスゲイン450にて実験を行った。

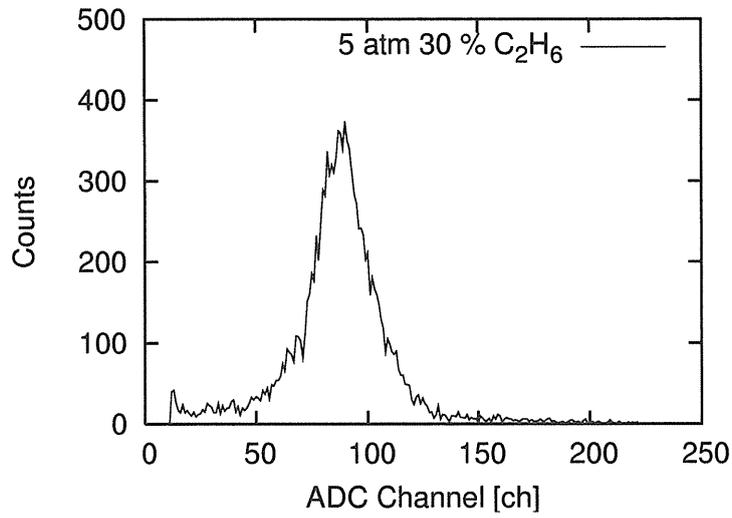


Fig. 7 Pulse height distribution under gaseous condition of 5 atm 30 % C₂H₆ and applied voltage of 2200 V

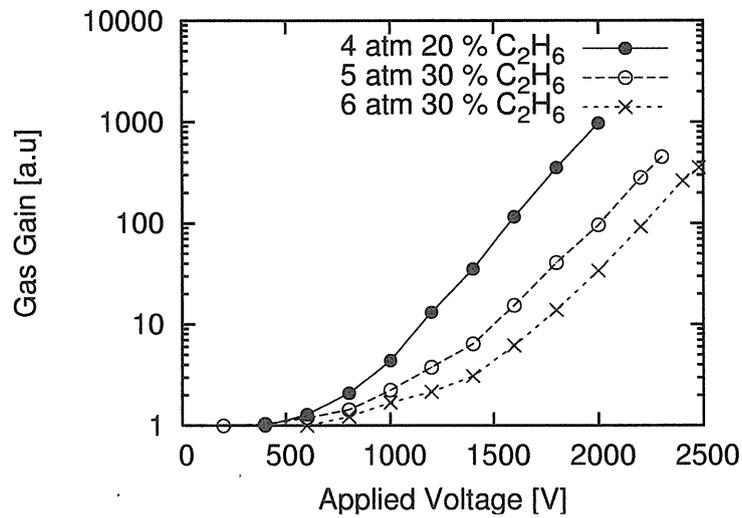


Fig. 8 Gas gain as a function of anode applied voltage

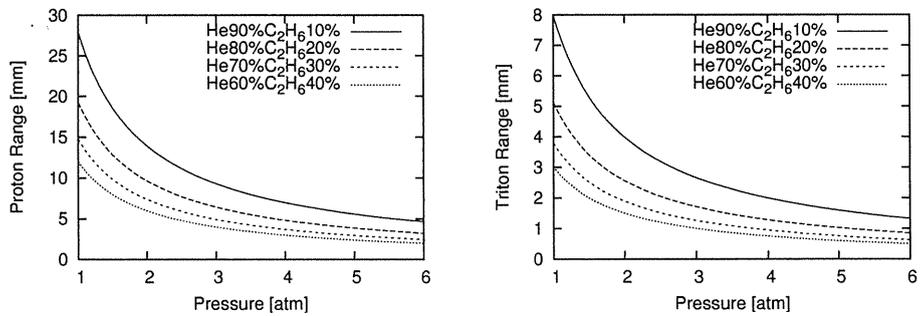


Fig. 9 Proton and triton range in the mixture gas

4.1.3 陰極及びカソードストリップの波高分布

二次元位置検出においては陰極及びバックストリップでの信号が十分な大きさである必要がある。その検証のため対象とする陰極及びバックストリップの直上に 1.3×1.3 mm ペンシルビームを入射し、その信号波高分布を測定した。その結果をFig.10に示す。小窓の図は電氣的ノイズを確認するために整形アンプのゲインを上げて測定した図である。出力波高の最頻値は陰極及びバックストリップでそれぞれ29.5、14.8 mVであったことから誘導される電荷の量は陰極の方が2倍大きいことが分かる。これは陰極とバックストリップ間の距離、またはバックストリップの幅によって変わる。現在は陰極-バックストリップ間の距離は0.8 mm でさらに近接することでバックストリップと陰極の出力波高差を小さくできる。Fig.10が示すように本システムにおいて適切な波高に閾値を設定することで電氣的ノイズと中性子信号を確実に分離できることを確認した。

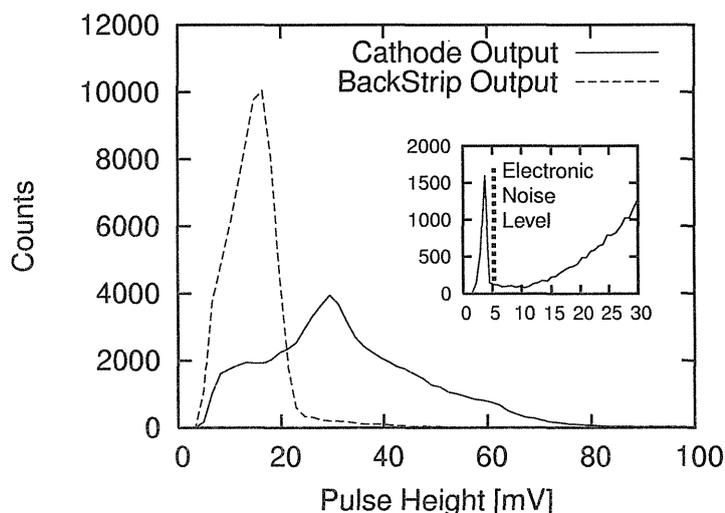


Fig. 10 Pulse height distribution of a cathode and a back strip when the pencil-like neutron beam was irradiated on these strips.

4.1.4 均一性の測定

3.1、3.2節で述べたようなシステムを使って中性子入射二次元位置検出の測定を行った。実験の概略図をFig.11に示す。検出素子の均一性を調べるために検出素子の有感面を 7×7 の領域に分け、それぞれの領域の中央に 1.3×1.3 mm に絞った中性子ビームを入射させ、その領域でのカウント数の比較を行った。

Fig.12に(C1,B4)から(C7,B4)へビームを移動させた時の検出素子全体におけるカウント値のアンプ閾値依存性を示す。設定閾値を1.6 mVから2.4 mVまで変化させ測定した。本システムの閾値は系の電気ノイズを分離するよう高く設定するが、同時に絶対効率及びその空間一様性を損なわないよう適切な値とする必要がある。

閾値を2.4 mVまで上げたときにはC1の場所でガスゲイン低下のためカウントの減少が見られ

るが、1.6 mV から 2.1 mV の閾値では比較的良い均一性を保っていることが分かる。また閾値を 2.1 mV に設定した時の全検出領域におけるカウント値の比較を Fig.13 に示す。各領域のカウント値のばらつきは最大で平均値から $\pm 8\%$ で良い均一性を持っていることを確認した。実機の使用においては検出領域全体にわたってでの動作では感度補正及び較正を行うためさらに良好な均一性が確保される。

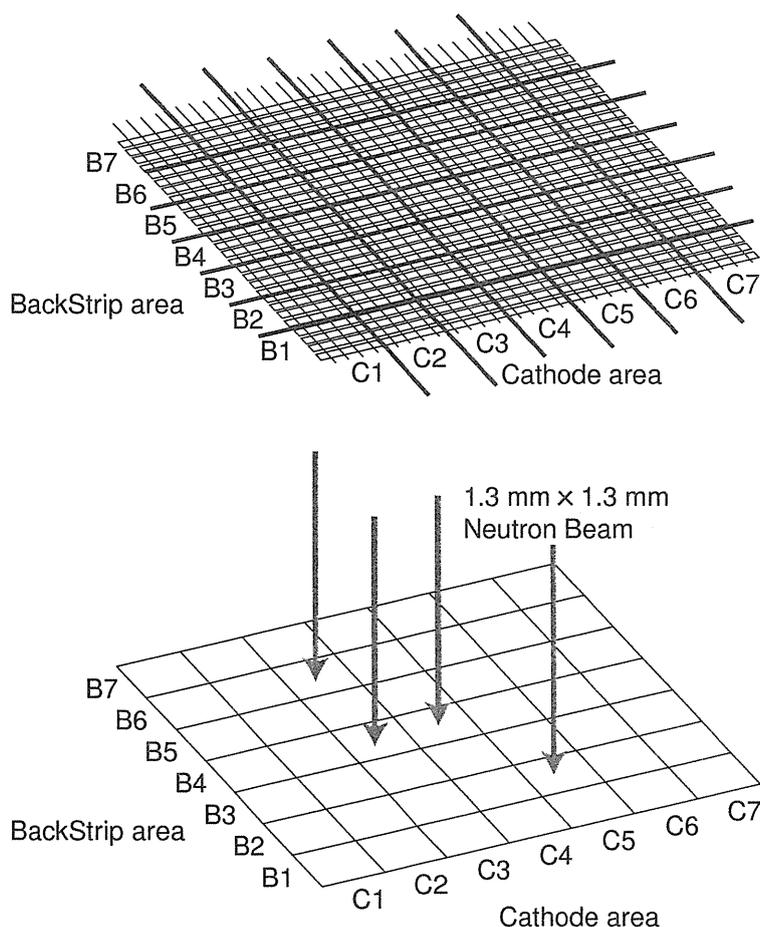


Fig. 11 Schematic layout of the neutron beam experiment

4.2 位置分解能の測定

陰極と垂直な方向を X 方向、一方バックストリップと垂直な方向を Y 方向と定義したときの 7x7 領域での X 方向及び Y 方向の実測半値幅を測定した。X、Y 方向の実測半値幅の比較をそれぞれ Fig.14、15 に示す。5 atm 30% C_2H_6 のガス条件で飛程が 3.7 mm であることを考慮すると、全領域に渡って実測反値幅は良好であることを確認した。Fig.14 において X 方向の実測半値幅が素子端部において (図中 C1, C7) やや劣化している。これは素子端部におけるガスゲイン低下によるものと考えている。現在のシステムでは陰極及びバックストリップ信号は同一閾値を用いているため、信号波高の低いバックストリップ信号によりイベント検出が決まる。複数のバックストリップに渡っ

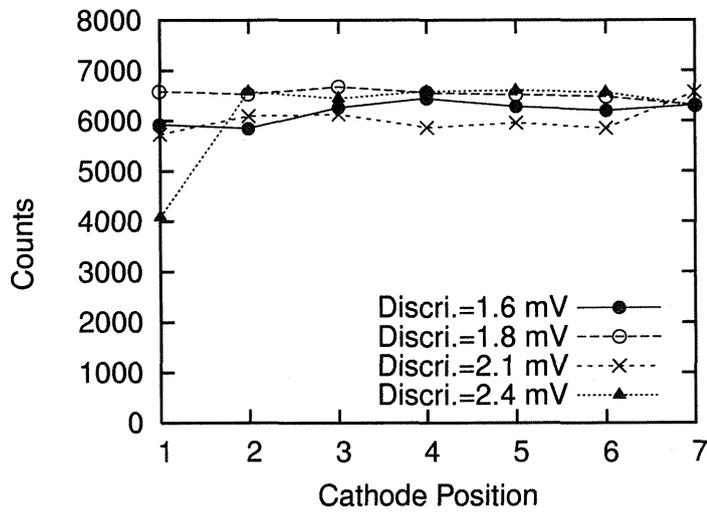


Fig. 12 Total counts within the divided area(C_i,B₄)(i=1~7)

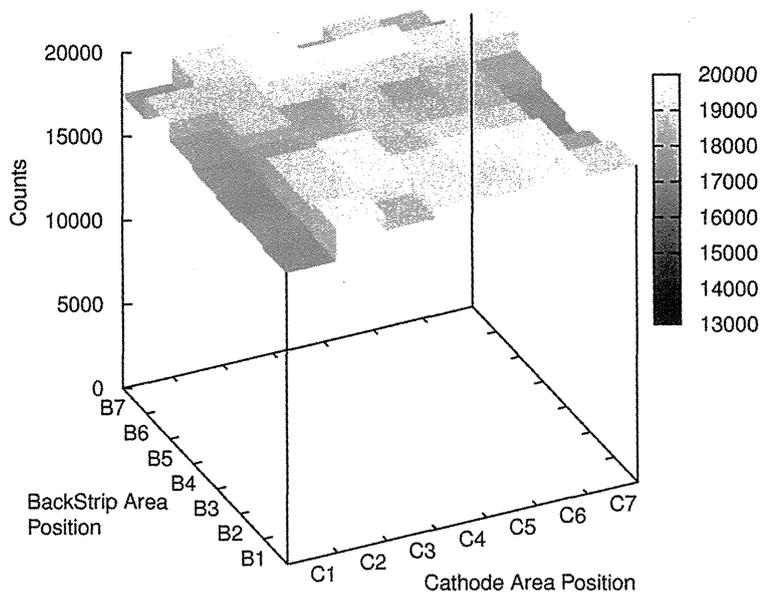


Fig. 13 Total counts within the divided area

てプロトンとトリトンの飛跡がヒットする場合には、電荷が各バックストリップに分割されるのでガスゲインが低い領域では波高が閾値以下になってしまう。その結果素子端部においてはバックストリップと平行、すなわち陰極と垂直な投影飛跡をもつようなイベントの割合が多く占めるようになり、X方向の位置分解能が劣化したと考えられる。これはFig.13に示した計数の空間一様性が素子端部において減少し、計数の数え落としが増加していることから裏付けられる。またFig.15に示したバックストリップによるY方向の位置分解能が素子端部において劣化していないことからその妥当性分かる。これらは陰極及びバックストリップをそれぞれ別々の閾値に設定する方式で解決されるし、ガスゲインの増大や、荷電粒子飛跡の低減によっても改善可能である。

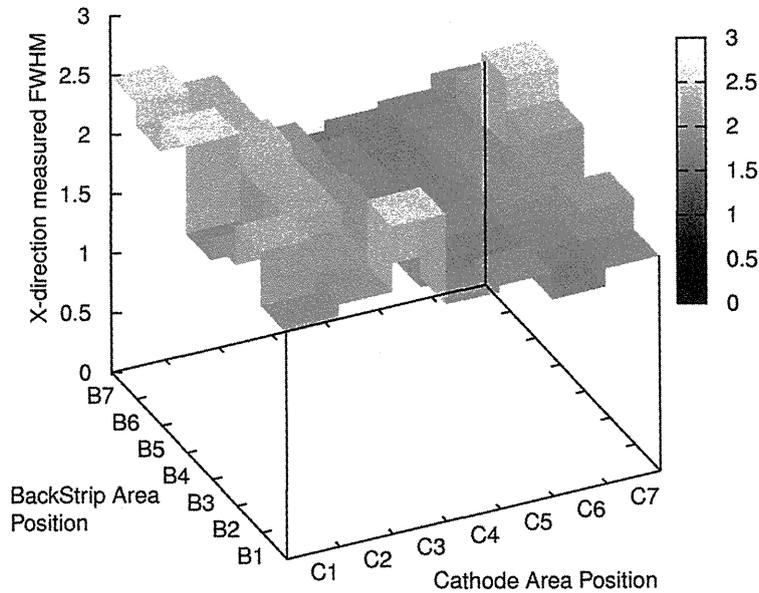


Fig. 14 X-direction measured FWHM

Fig.16に検出素子中央(C4,B4)に1.3×1.3 mm中性子ビームを入射させたときの二次元ビームプロファイルを示す。素子中央においては最良の位置分解能が得られ、X方向、Y方向での実測値半値幅はそれぞれ1.7、1.9 mm(FWHM)であった。ビーム幅がガウス分布を持つと仮定したときにX方向、Y方向での固有位置分解能は、それぞれ1.4、1.6 mmに相当した値であった。

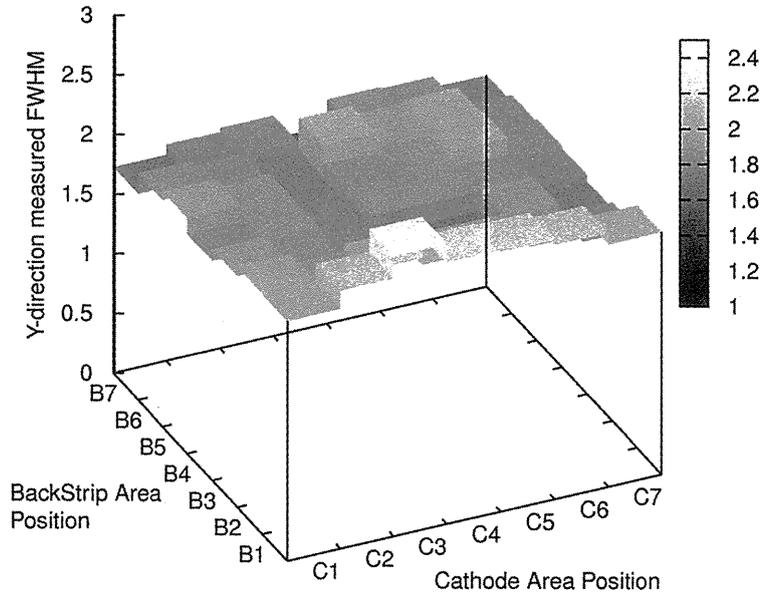


Fig. 15 Y-direction measured FWHM

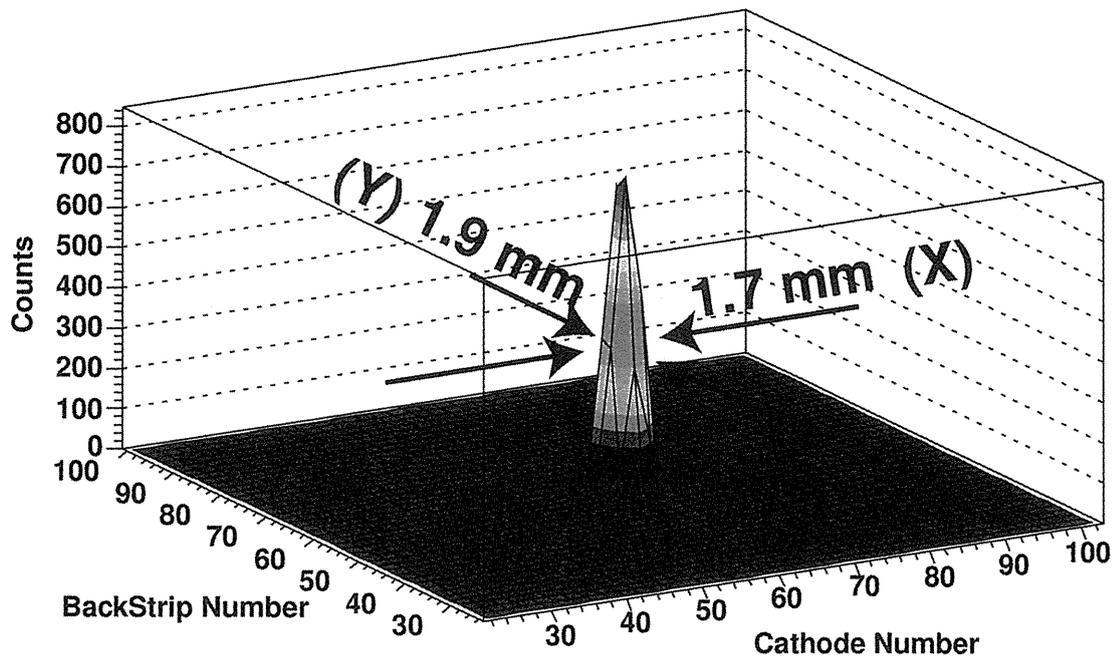


Fig. 16 2-dimensional neutron beam image. The beam size was 1.3×1.3 mm neutron beam injected at the center of the detector

5 結論

次世代中性子イメージ検出器として検出素子からの全チャンネル信号を個別に高速読み出しを行うシステムを開発した。MWPCを検出素子として信号個別読み出し、中性子位置コンバータ、データ表示までの一連のシステムを構築し、開発した検出システムの性能試験を中性子ビームを用いてガスゲインの測定を行い、5 atm ^4He , 30 % C_2H_6 (0.26 atm ^3He) 混合ガスにおいてガスゲイン450で長時間安定に動作することを確認した。また1.3 × 1.3 mmにコリメートしたペンシルビームを用いて検出素子の各エリアでの検出効率の均一性を調べたところ感度補正無しで±8%のよい均一性を有することを確認した。また実測半値幅は有感領域全体に渡って1.7~2.5 mmであり、検出素子中央部において陰極、バックストリップの方向での実測半値幅はそれぞれ1.7、1.9 mm(FWHM)と最良であった。これは中性子ビームサイズを考慮するとそれぞれ1.4、1.6 mm(FWHM)の位置分解能に相当する。以上の結果から開発した個別読み出し型二次元検出システムの正常動作を確認した。今後は本検出システムの動作条件の最適化を図りさらなる高位置分解能化をすすめる。また大強度パルス中性子に対応するためマイクロパターン素子を用いた高速、高位置、高効率中性子検出器の確立を目指す。

謝辞

中性子実験全般においてご教授いただきました中性子利用研究センター・片桐政樹氏、坂佐井馨氏に、三号炉での中性子ビーム実験にてご指導頂きました中性子利用研究センター・盛合敦氏、山崎大氏、研究炉部・田村格良氏に、エレクトロニクス全般でご教授いただきました工作技術グループの美留町厚氏、海老根守澄氏に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] R.G. Cooper: Nucl. Instr. and Meth. A529, 394 (2004)
- [2] A.Oed: Nucl. Instr. and Meth. A263, 351 (1988)
- [3] T.Tanimori, A. Ochi, S. Minami and T. Nagase: Nucl. Instr. and Meth. A381, 280 (1996)
- [4] H.Yamagishi et. al.: Nucl. Instr. and Meth. A529, 365 (2004)
- [5] H.Yamagishi et. al.: Rev. Sci. Instrum. 75, 2340 (2004)
- [6] T. Nakamura et. al.: Nucl. Instr. and Meth. A529, 336 (2004)
- [7] N.J.Rhodes et. al.: Nucl. Instr. and Meth. A529, 243 (2004)
- [8] D.P.Hutchinson et. al.: J. Neutron. Res. 123, 4 (1996)
- [9] K.Hirota et. al.: Nucl. Instr. and Meth. A529, 417 (2004)
- [10] M.Katagiri et. al.: Nucl. Instr. and Meth. A529, 274 (2004)

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光強度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- E C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

- 1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15°C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

個別読み出し型二次元中性子ガス検出器の開発 | 中性子ビームによる動作試験と検出システムの構築 |

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています