

JAERI-Research
2003-012



JP0350233



中性子散乱実験用マイクロストリップガスチェンバーの開発
— エンコードボードの開発とシミュレーション —

2003年6月

正岡 聖・中村 龍也・山岸 秀志・曾山 和彦

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。

入手の問い合わせは、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、お申し越し下さい。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行っております。

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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

中性子散乱実験用マイクロストリップガスチェンバーの開発
— エンコードボードの開発とシミュレーション —

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター
正岡 聖・中村 龍也・山岸 秀志・曾山 和彦

(2003年4月8日受理)

大強度陽子加速器施設での中性子散乱実験用の高速・高効率・高位置分解能の2次元中性子検出器として、マイクロストリップガスチェンバー(Micro-strip Gas Chamber: MSGC)の開発を行っている。今回 FPGA(Field-Programmable Gate Array)を搭載したエンコードボードを開発した。FPGA は、そのロジックをプログラミングすることによって、MSGC からの信号をデジタル処理することができ、プロトンとトリトンが形成するトラックの情報を読み出すことができる。従って、我々は、一連のデータ処理システムを使って近似的にトラックの中心を中性子核反応位置として表示する方法で位置情報を得ることができる。中性子照射実験を想定してシミュレーションを行った結果、現在のデータ処理システムで 1.6mm 以下の位置分解能が得られることが分かった。

Development of Micro-strip Gas Chamber for Neutron Scattering
— Development and Simulation of Encode Board —

Sei MASAOKA, Tatsuya NAKAMURA, Hideshi YAMAGISHI and Kazuhiko SOYAMA

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 8, 2003)

A micro-strip gas chamber (MSGC) using helium-3 gas has been developing as a two-dimensional position sensitive neutron detector for neutron scattering experiments in a high-intensity proton accelerator facility. We have developed the encode board that have built-in FPGAs (Field-Programmable Gate Array). Logics of FPGAs can be freely programmed to carry out digital processing of signals from MSGC and information of the tracks of protons and tritons can be obtained by the encode board. Therefore, the position of neutron capture (more properly the centra of the track) can be calculated by a series of data handling system. As the result of the simulation of a neutron detection experiment, it has proved that the position resolution of less than 1.6 mm can be obtained by using this data handling system.

Keywords: Micro-strip Gas Chamber, Helium-3, Two-dimensional, Neutron Detector, Encode Board, Proton, Triton, FPGA, Position Resolution

目次

1. 序論	1
2. 中性子用マイクロストリップガスチェンバーの構造と原理	1
3. 波高分布およびプロトンとトリトンの飛程の計測実験	2
4. 高速データ処理システム	5
4.1. MSGC と高速プリアンプ (ADC)	5
4.2. エンコードボードとその FPGA ロジック	7
4.3. マルチパラメータデータ収集システム (MPA-3) によるグラフ表示	9
5. 信号パルス分布のシミュレーション	10
6. 結論	13
謝辞	14
参考文献	14

Contents

1. Introduction	1
2. Structure and Detection Principle of Micro-strip Gas Chamber	1
3. Measurement of Pulse Height Distribution and Range of Proton and Triton	2
4. High-speed Data Handling System	5
4.1. Micro-strip Gas Chamber and High-speed Preamplifier	5
4.2. Encode Board and Logic of FPGA	7
4.3. Graphical Representation by Multiparameter Data Acquisition System	9
5. Simulation of Signal Pulse Distribution	10
6. Conclusion	13
Acknowledgment	14
References	14

This is a blank page.

1. 序論

大強度陽子加速器計画で建設される物質・生命科学実験施設において、パルス中性子散乱実験で使用される中性子検出器として重要視されることは、高検出効率、高位置分解能、高動作安定性、大面積化、そして、大強度に対応できるだけの高計数率を保てるということである。計数率に関しては、検出器全体で 10^6cps 以上、中性子が局所的に入射する場合に限り、 $10^6\text{cps}/\text{mm}^2$ 以上必要とされる。

現在原子炉で使用可能な中性子検出器としては、ヘリウム3比例計数管、シンチレータ、イメージング・プレート、マルチワイヤー式比例計数管(MWPC)などがある。これらの検出器はいずれも高計数率に対応したものではなく、また位置分解能、検出効率に関してもそれぞれに一長一短がある。一方、現在開発している中性子用マイクロストリップガスチェンバー(MSGC)は、アノード・カソード間の距離が $40\mu\text{m}$ と短いため、高速での動作が可能であり、上記要求を一挙に満足することができる。MSGCはX線では十分な実績がある^{1,4)}が、中性子用MSGCはILLなどで開発が進められている^{5,6)}ものの、物質・生命科学実験施設で目標としている高速・高位置分解能に対応したものはまだ実現されていない。

中性子用MSGCのコンバータとしてはヘリウム3ガスとガドリニウム薄膜を想定していたが、ガドリニウムに関しては、位置分解能はいいが、 γ 線弁別が難しく、シミュレーションによればせいぜい200程度の n/γ 比しか得られないことが分かった⁷⁾。一方、ヘリウム3ガスは非常に優れた γ 線弁別能をもっており、また、 1mm 以下 $400\mu\text{m}$ 程度の位置分解能、70%以上の検出効率、 10^6cps 以上の計数率が期待できる。

しかし、これらの性能は、信号をデジタル変換した後の信号処理システムを確立して初めて得られるものである。そこで、我々は、FPGA(Field-Programmable Gate Array)を搭載したエンコードボードを開発し、プログラミングによってこれらのデジタル処理を行えるようにし、一連のデータ処理システムを用いて中性子照射実験をシミュレーションした。このレポートでは、エンコードボードの開発を中心に、JRR-3Mで行った中性子照射実験など、MSGCの現在までの開発状況を述べると共に今後の展望について示す。

2. 中性子用マイクロストリップガスチェンバーの構造と原理

Fig. 1に我々が設計した中性子用MSGCの原理図を示す。アルミニウムのウィンドウから入射した中性子はドリフトプレーンとキャピラリープレートの間のドリフト領域で ^3He 原子と核反応を起こしてプロトンとトリトンを生成する。入射中性子のエネルギーは高々数eV程度であるのに対して、プロトンとトリトンのエネルギーはそれぞれ 574keV 、 191keV であるので、ほぼ等方的に放出される。これらはヘリウムガス中を進む間に他の ^3He 原子と衝突を繰り返して電離電子を生成し、この電子は電場によってキャピラリープレート⁸⁾に到達する。キャピラリープレートで数百倍に増幅された後、電子はMSGCで数十倍に増

幅され、アノードに取り込まれる。この際生成する陽イオンがカソードに取り込まれることにより、バックストリップにも電流が誘起される。そしてこれらの直交するアノード、バックストリップからの信号を検出することにより、2次元位置検出を行うことができる。

X線用MSGC¹⁻⁴⁾では、検出するX線のエネルギーは高々数keV程度のオーダーである。従って、1気圧のAr(またはXe)+C₂H₆中での飛程はストリップ1,2本分程度なので、ガスフローで十分であり、100μm以下の高位置分解能、10⁷cps/mm²の高計数率を容易に得ることができる。しかし、中性子の場合にはプロトンの純³Heガス中での飛程は5.7cm/barであるように、飛程が非常に長いので、高計数率・高位置分解能を得るためには、ガスを封じ込め型にし、7~10気圧程度まで上げて飛程を短くし、また、C₂H₆, CF₄などの添加ガスを封入しなければならない。そうして1mm以下の位置分解能を得ることが可能となるのである。

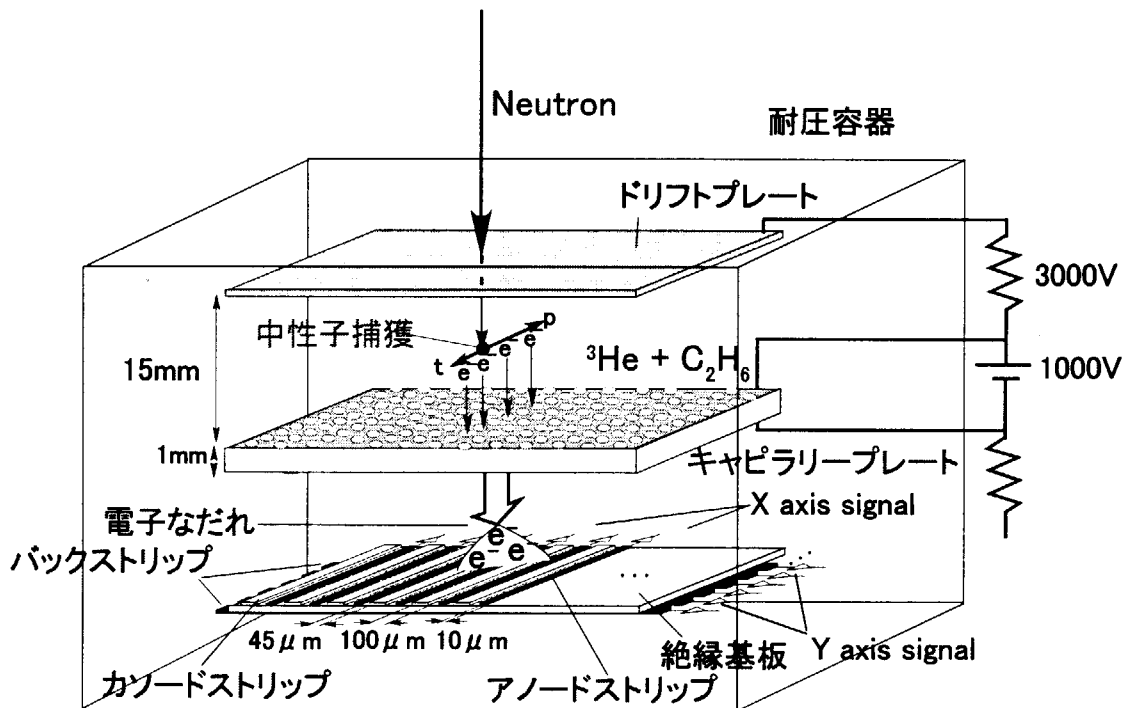


Fig. 1 Structure of the MSGC for Two-dimensional neutron measuring.

3. 波高分布およびプロトンとトリトンの飛程の計測実験

今回の実験の目的は、まず、ヘリウム3原子の中性子捕獲による信号をMSGCで検出して波高分布をとり、ガスゲインを調べてノイズと弁別できることを確かめることである。次に、ガス中でのプロトンとトリトンの飛程が位置分解能に効いてくるので、これらを測定することである。飛程は各ストリップから取り込まれる信号を調べることで分かる。実験はJRR-3MのガイドホールC2-3ポートで行った。

MSGC 素子には 5cm 角のものを使用した。ピッチ幅は $200\ \mu\text{m}$ 、チャンネル数は 256 である。ガスは 3 気圧の $\text{He}(90\%)+\text{C}_2\text{H}_6(10\%)$ の混合ガスを封入した。ヘリウムガスに関しては、 ^3He ガスは 15Torr で、残りは ^4He ガスとした。電子の飛程は両者で変わらないので、飛程に関してはすべて ^3He ガスを使用した場合と同様に考えてよい。冷中性子ビームは直径 0.8mm 程度にコリメートし、MSGC 素子面に垂直に入射するよう検出器を設置した (Fig. 2)。そして、MSGC のアノードストリップの内、中央の 2 本をまとめたものと、それ以外のすべてのストリップをまとめたものと別々にしてそれぞれ電荷感応型プリアンプに繋いだ。今回の実験では、多チャンネル高速アンプがまだ納入されていないため、位置検出は行わず、中性子の検出そのものに主眼をおいた。

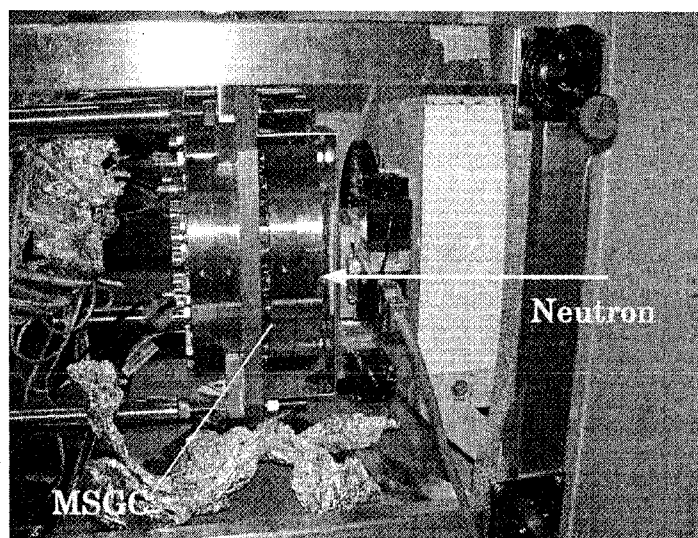


Fig. 2 Schematic view of neutron detective experiment.

波高分布は、アノードストリップの内、中心の 2 本をまとめたものから得られるものと、その 2 本以外のすべてのアノードから得られるものとに分けて測定したところ、それぞれ Fig. 3(a), (b) のようになった。ここでは波高を電荷に換算してある。このときの電圧はドリフト領域 3000V、アノード 200V、カソード -150V である。また、検出器全体での計数率は 150cps であった。Fig. 3(a) より、アノードストリップに取り込まれる信号はノイズから分離できる波高レベルを持つことが分かった。Fig. 3(b) より、一般にヘリウム 3 比例計数管から得られる波高分布と同様の分布を示しているので、全体として正しい波高分布が得られており、このときのガスゲインは 20 であった。

飛程の測定についてはまず以下のようにして多チャンネルでの読み出しを模擬した。Fig. 4(a), (b) にその模式図を示す。ここではストリップ 127, 128 の 2 本を 1 つにまとめている。使用した MSGC 素子は X 線用でピッチ幅が $200\ \mu\text{m}$ であるが、中性子用のものは $400\ \mu\text{m}$ ピッチを想定しているため、2 本を擬似的に 1 本のストリップからの信号とみなした。そして検出器をアノードストリップの向きに対して垂直な方向になるよう、中性子ビームに

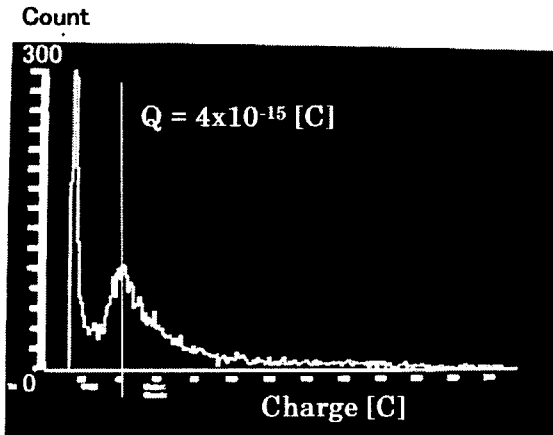


Fig. 3(a) Charge distribution by 2 anode strips.

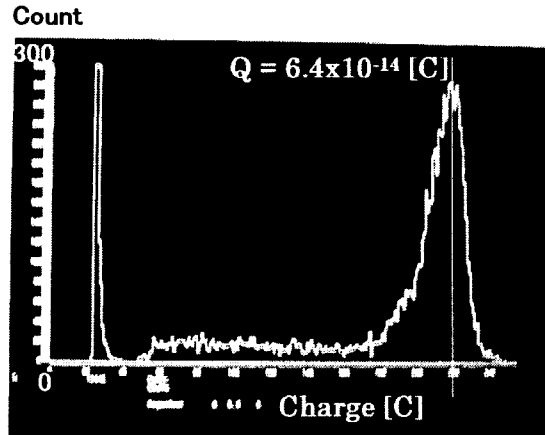


Fig. 3(b) Charge distribution by all anode strips except 2 ones of Fig. 6(a).

対して動かす。Fig. 4(a), (b)でいうと、Fig. 4(a)では中性子ビームがちょうどその2本のストリップ上にきており、Fig. 4(b)では検出器をストリップ2本分だけ上に動かした。するとこのストリップ 127, 128 は Fig. 4(a)におけるストリップ 125, 126 と同じ位置にくることになる。つまり、Fig. 4(b)では Fig. 4(a)におけるストリップ 125, 126 で検出されるのと同様の信号が検出されることになる。従って、このようにして検出器をずらしていけば、各ストリップで計数される信号の個数が分かる。測定は、検出器位置を動かすごとに 300sec ずつ行い、アノードの全部のストリップに取り込まれた信号の数に対する真ん中の2本のストリップに取り込まれた信号の数の割合を計算することによって、各ストリップ上をプロトンあるいはトリトンが通過する割合を求めた。

測定結果は Fig. 5 中(a)のようになった。初めの検出器の位置を原点、Fig. 4(a), (b)の上下方向すなわちアノードストリップに対して垂直な方向を横軸としている。Fig. 5 中(a)は図中(b), (c)に分離することができ、プロトンとトリトンの飛程は 3:1 で

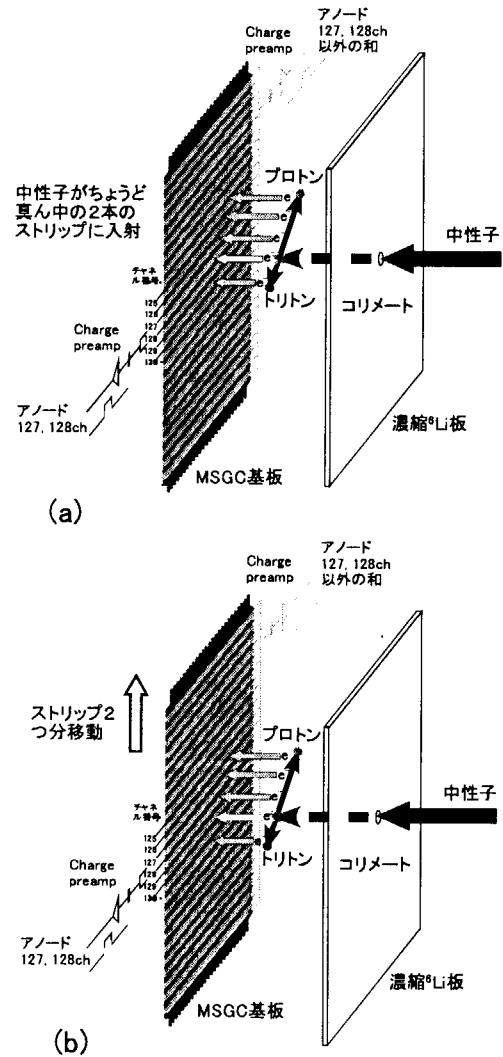


Fig. 4 Schematic structure of quasi-multi-channel readout.

あるので、(b)がプロトン、(c)がトリトンによる信号であることが分かる。従って、この図から、3気圧 He(90%)+C₂H₆(10%)混合ガス中でのプロトンとトリトンの飛程はそれぞれ 9.5mm, 3.0mm であることが分かった。

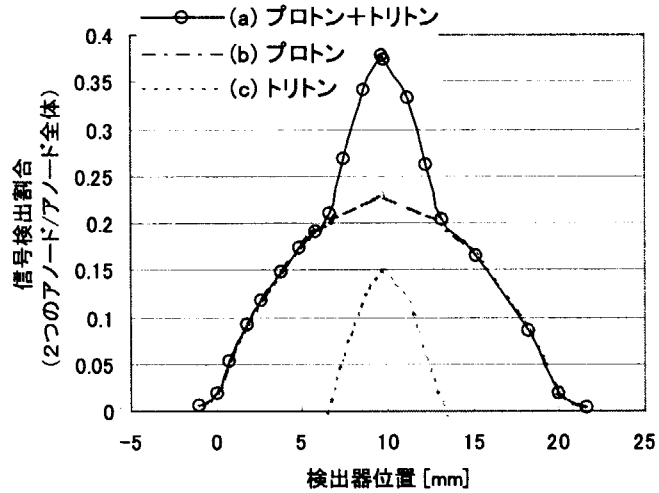


Fig. 5 Ratio of signal detected by 2 anode strips as a function of the detector position.

4. 高速データ処理システム

従来の検出器の内、イメージング・プレートは数十 μ m 程度の高位置分解能が得られるが、積分型であるため時間情報が取れず、飛行時間測定(TOF)には使えない。MWPC などでは抵抗分割方式、あるいは遅延方式などがとられているが、これらのアナログ方式では高計数率は望めない。また、ヘリウム3比例計数管などのワイヤー式検出器では、大強度下ではアノード芯線付近で陽イオンが飽和するため、計数率は局所的に入射した場合は高々 10^4 - 10^5 cps 程度である。現在使用されているシンチレーション検出器は、主に ZnS を材料として使っているが、 10^5 cps 程度とそれほど高い計数率が取れず、検出効率も 20%程度である。

一方、MSGC は微分型検出器なので高速対応しており、現在原子炉で使用されている中性子検出器では実現しえなかった高計数率・高位置分解能・高検出効率で TOF も同時に行うことが可能である。但し、これらの性能は、信号をストリップに取り込んだ後、これらに対応したデータ処理システムを確立してこそ実現するものである。MSGC で信号を取り出してからパーソナルコンピュータでグラフ表示するまでの一連のダイアグラムを Fig. 6 に示す。本章ではこの流れに沿って順番に説明していく。

4.1. MSGC と高速プリアンプ (ADC)

使用する MSGC 基板は、 $50 \times 50 \text{mm}^2$ の大きさで、アノード・バックストリップが 256 本ずつ $200 \mu\text{m}$ ピッチで基板の表裏に直交して並んでいる。ストリップごとに取り出した信号電流を高速アンプ ADC・波高弁別器によりパルス化してデジタル信号にする。従って、

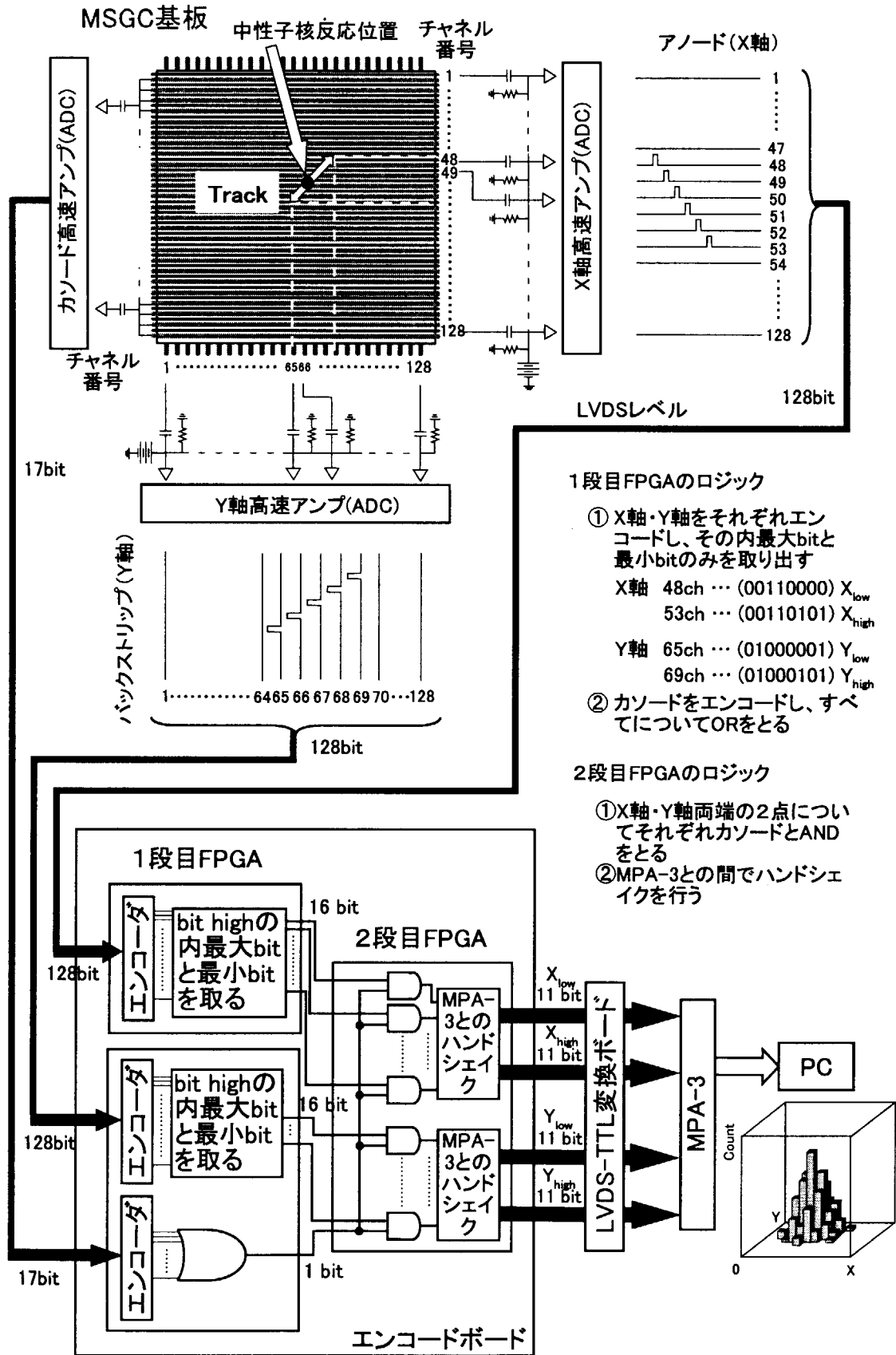


Fig. 6 Schematic diagram of the data handling system

ここではエネルギーの大きさは計測せず、ヒットしたストリップの番号のみを高速に記録していくというフルリードアウト方式をとっている。そして、波高弁別レベルを変えることにより、信号とノイズを弁別するので、ある程度信号が大きくなってはならない。一方、MSGCはガスゲインが数1000倍と小さく、また中性子の場合は $500\mu\text{m}$ 程度であればかなりの高位置分解能である。従って、ストリップ間隔はX線のときほど短くする必要はなく、 $400\mu\text{m}$ 程度で十分であるので、これら256本のストリップはアノードとバックストリップでそれぞれ2本ずつを1つにまとめており、それは $400\mu\text{m}$ ピッチで128本ずつ並べたのと等価である。また、カソードに関しては、計255本のストリップを15チャンネルずつまとめ、17ビットのデジタル信号として出力している。この高速プリアンプADCでは、50nsec程度のパルス幅の入力信号は15nsec弱のパルス幅に整形される。尚、デジタル信号はLVDSレベルで出力される。LVDSはTTLと比べて消費電力が小さく、ノイズが少ない。

4.2. エンコードボードとそのFPGAロジック

エンコードボードでは、内部のFPGAで高速アンプからのデジタル信号をエンコードし、信号処理を行う。Fig. 7にエンコードボードの写真を示す。FPGAはデジタルIC素子の一種で、汎用LSIとASICの中間に位置し、ANDやORなどの論理計算を行うことができる。FPGAには、SRAM型、PROM型、ヒューズ型のものがあり、我々は回路データの修正が行え、電源を切断してもデータが消去されないPROM型のものを使用している。Fig. 6に示すように、FPGAは1段目に2つ、2段目に1つ使用する。これらは共にザイリンクス社製のVirtex-Eであり、1段目はXCV1000E、2段目にはXCV400Eを使用した。これらの仕様をTable1に示す。このVirtex-Eの動作速度は130MHzである。

Table 1 Virtex-E FPGA Family (XCV1000E, XCV400E)

Device	Package	System Gates	Logic Gates	CLB Array	Logic Cells	Maximum I/O	Differential I/O Pairs
XCV1000E	FG900	1,569,178	331,776	64×96	27,648	660	281
XCV400E	BG560	411,955	129,600	40×60	10,800	404	183

1段目のFPGA(XCV1000E)にはアノード・バックストリップから128ビットずつ、カソードから17ビット入力される。ここでは、まずレベルHのビットをエンコードする。例えば、50チャンネルに信号が入った場合、00110010とエンコードされ、8ビットで1つの信号のチャンネル番号を表すことになる。X線の場合は飛程が短いので、ヒットしたストリップの信号をすべて取り出しても問題はないが、中性子の場合は生成物(特にプロトン)の飛程が長いので、ヒットしたストリップの信号を全部取り出そうとすると、処理速度が遅くなり、高計数率が保てなくなる。そこで、エンコードしたものの内最上位ビットと最下位

ビットのもの、すなわち、ヒットしたストリップの内、アノード (X 軸) とバックストリップ (Y 軸) のそれぞれについてチャンネル番号が最大のもので最小のもののみ取り出すようプログラミングしてある。つまり、 X_{low} 、 X_{high} 、 Y_{low} 、 Y_{high} それぞれ 8 ビットずつ、計 32 ビットのデータを 2 段目の FPGA に渡す。また、カソードからのデジタル信号についてもエンコードを行い、17 ビットの OR をとって、1 ビットで 2 段目の FPGA にデータを渡す。

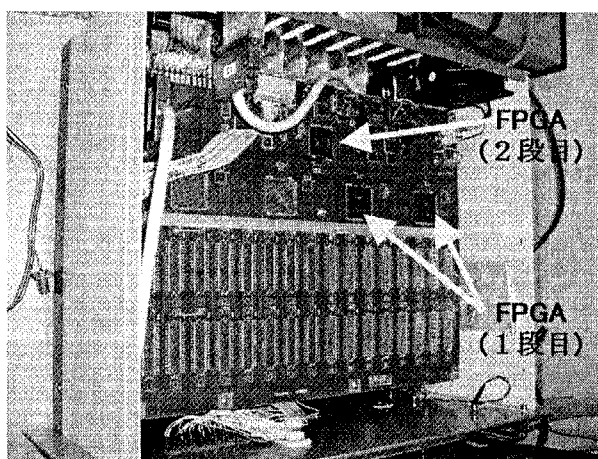


Fig. 7 Encode board.

2 段目の FPGA(XCV400E)では、アノードからの 16 ビットとカソードからの 1 ビット、バックストリップからの 16 ビットとカソードからの 1 ビットでそれぞれの AND をとり、カソードがレベル H の場合のみ、データを出力するようにしてある。これは、放電によるパルスを取り除き、MSGC での電子なだれによる信号のみを確実に取り込むために行うものである。また、軌跡の長いものも破棄する。即ち、ヘリウム 3 のガス圧からプロトンの飛程が分かるので、トラックの最上位ビットと最下位ビットの差から、それより長いものを FPGA のプログラミングで破棄するよう設定する。従って、中性子が一度に 2 個以上入射した場合などは、見かけ上非常に長い軌跡のプロトンが生成したように見えるが、このようなデータを取り込まないようにしてある。また、中性子が連続的に入射するような場合は処理が間に合わないので、FPGA 側のロジックで処理中に入ってきたデータは破棄するようにプログラミングしてある。

また、ここでは MPA-3 と通信してデータを送るためのハンドシェイクの機能もプログラミングしてある。ハンドシェイクロジックを簡単に表すと Fig. 8 のようになる。まず、①最初きた信号をトリガとする。②トリガ信号が入ったら FPGA 側は MPA-3 に対して Dead time 信号を送る。TOF 測定を行う場合はこの立ち上がり時間が信号検出時間

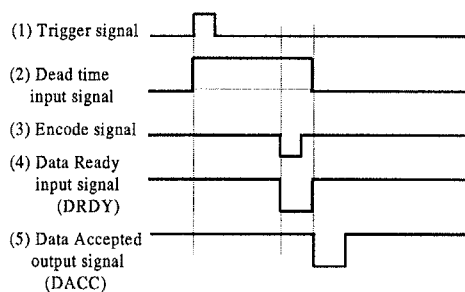


Fig. 8 Hand shake logic

となる。③エンコードした最大ビットと最小ビットのデータを送る。④エンコード終了時に MPA-3 に Data Ready 信号を送る。⑤Data Ready 信号を受け取ると、MPA-3 は FPGA に Data Accept 信号を送る。FPGA はこの信号を受け取ると、また新しいデータを取り込む準備をする。ここで、ハンドシェイクを行うのに Dead time 信号、Data Ready 信号、Data Accept 信号の送受信に 3 ビット必要となるため、MPA-3 との接続にはそれぞれ 11 ビットずつ、計 44 ビット必要となる。

このようにして、エンコードボードから MPA-3 へのデータの受け渡しを行っている。ここで、エンコードボードの出力と MPA-3 の入力のレベルが違うので、Fig. 6 にあるように、LVDS-TTL 変換ボードで TTL レベルに変換している。

4.3. マルチパラメータデータ収集システム (MPA-3) によるグラフ表示

エンコードボードでエンコードされた各 X 軸・Y 軸の最大ビットと最小ビットのデータは、計 32 ビット (4×8 ビット) でエンコードボードから出力され、FAST ComTec 社製のマルチパラメータデータ収集システム (MPA-3) へと送られる。Fig. 9 に MPA-3 の写真を示す。MPA-3 は、エンコードボードの FPGA との間でハンドシェイク機能により、両機器間で通信しながらデータを受信できるようになっており、レートが異なるものでも確実に受信できるようになっている。そして、エンコードボードからのデータをエネルギーごとに格納し、そしてヒストグラム表示まで行うことができる。さらに、物質・生命科学実験施設の場合はパルス中性子の周波数(25Hz)、原子炉で中性子をチョッパーによりパルス化した場合はチョッパーの周波数に合わせたクロック信号を MPA-3 に入力することによって、TOF 測定も行うことができる。ここでは、エンコードから送られた X 軸・Y 軸のデータ、すなわちもともとのトラックの両端の 2 点の中心を計算して近似的に中性子の反応位置とみなしてグラフに表示するという方式をとることにした。実際はプロトンとトリトンの飛

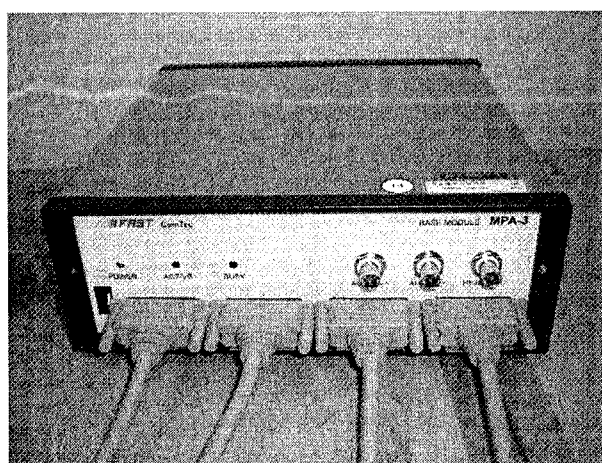


Fig. 9 Multi-parameter data acquisition system.

程は3:1なので、厳密には反応位置はトラックの中心ではないが、ガス圧を7~10気圧程度まで上げたときのこのずれは数百 μm 程度となり、これは許容範囲である。

5. 信号パルス分布のシミュレーション

実験により3気圧He(90%)+C₂H₆(10%)混合ガス中でのプロトンとトリトンの飛程が分かったので、ここでは、その結果から信号パルス分布を3次元でプロットし、期待される位置分解能をシミュレーションによって導く。

我々は最終的には7~10気圧のガス密度で実用化することを目指している。封入ガス(He, C₂H₆)の混合比を一定にしてガス密度を増加させると、圧力からそのときのプロトンとトリトンの飛程が容易に計算でき、10気圧のガス密度であれば、それぞれ2.85mm, 0.90mmとなる。

入射中性子に対してある位置で生成するプロトンとトリトンがHe(90%)+C₂H₆(10%)混合ガス中で取り得る軌跡はFig. 10(a)のようになる。ここで、長い方がプロトン、短い方がトリトンの軌跡である。中性子がHeガス層で核反応を起こす位置は中性子入射直線上Heガス層内の任意の点である。反応がキャピラリープレートやドリフトプレートの近傍で起こった場合、これらによる壁効果でプロトンやトリトンの飛程が幾分短くなるが、キャピラリープレート・ドリフトプレート間の距離が15mmであるのに対し、10気圧ではプロトンの飛程は3mm弱なので、壁効果による影響は小さい。従って、プロトンやトリトンによって生成する電離電子がMSGC基板上のどのストリップに取り込まれるかは反応位置によらないものとする。従って、飛程を考慮してストリップに取り込まれる信号を模擬的に作り、これをエンコードボード・MPA-3の一連のシステムに取り込み、パーソナルコンピュータでグラフ表示させることによって、シミュレーションを行うこ

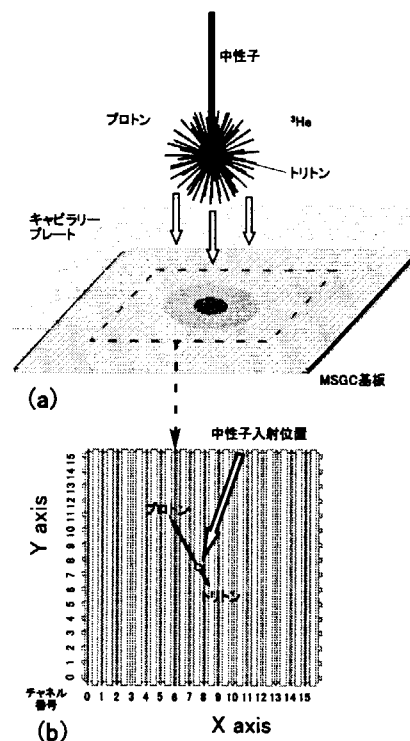


Fig. 10 Schematic view of detection of proton and triton emitted by neutron capture.

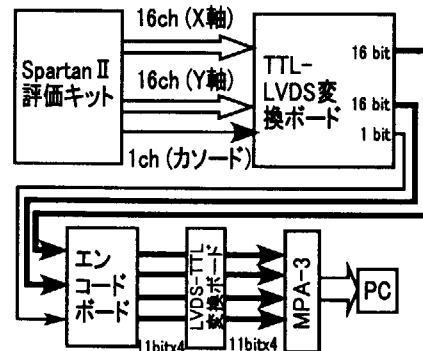


Fig. 11 Schematic diagram of simulation

とができる。

シミュレーションでは 10 気圧 He(90%)+ C₂H₆(10%)混合ガス中で ³He による中性子捕獲反応が起こり、プロトンとトリトンの軌跡の MSGC 基板面への投影図がストリップを横切った場合に信号として検出されるとして模擬信号を作った。Fig. 11 にシミュレーションのダイアグラムを示す。模擬信号発生装置には市販の Spartan II 評価ボードを使い、チャンネル数は 16(チャンネル)×16(チャンネル)で行った。Spartan II は出力が TTL レベルなので、エンコードボードに入力する際に LVDS レベルに変換する。中性子核反応が起こる点のごく近傍だけを見たいので、チャンネル数はこれだけあれば十分である。従って、Fig. 10(a)において、信号が入っている部分だけピックアップしてその中でシミュレーションを行うことを想定した(Fig. 10(b))。MSGC のピッチ幅(400 μm) 1 つ分がチャンネル 1 つ分に相当するとみなし、縦横のチャンネルが交わる部分を、各チャンネル番号 x, y を使って(x, y)と表すことにする。例えば、中性子がチャンネル x=5, y=7 の位置に入射したとすると、それは、(5, 7)に相当する。

まず、Fig. 12 のようにプロトンとトリトンのトラック(2点(7, 8)、(9, 2)間を通過)が 1 つだけ入った場合にどのようにエンコードされるかを調べた。ここでは分かり易いように同じトラックのパルスが連続してエンコードボードに入力されるようプログラミングしたところ、MPA-3 からの出力は Fig. 13(a)-(g)のようになった。Fig. 13(a)-(d)はそれぞれ X_{low}, Y_{high}, X_{high}, Y_{low} の結果、Fig. 13(e),

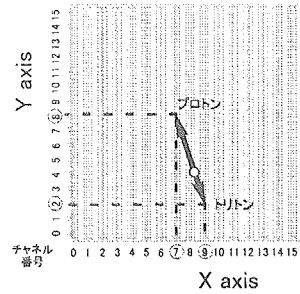


Fig. 12 Track of a proton and a triton of test simulation

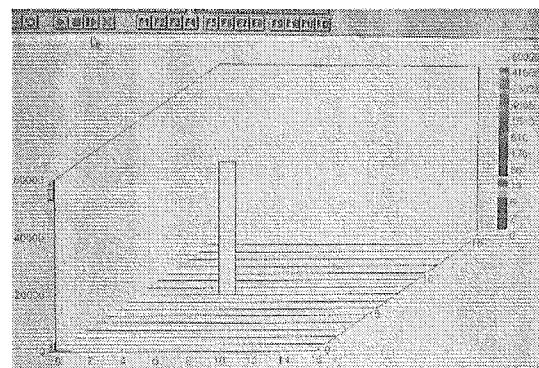
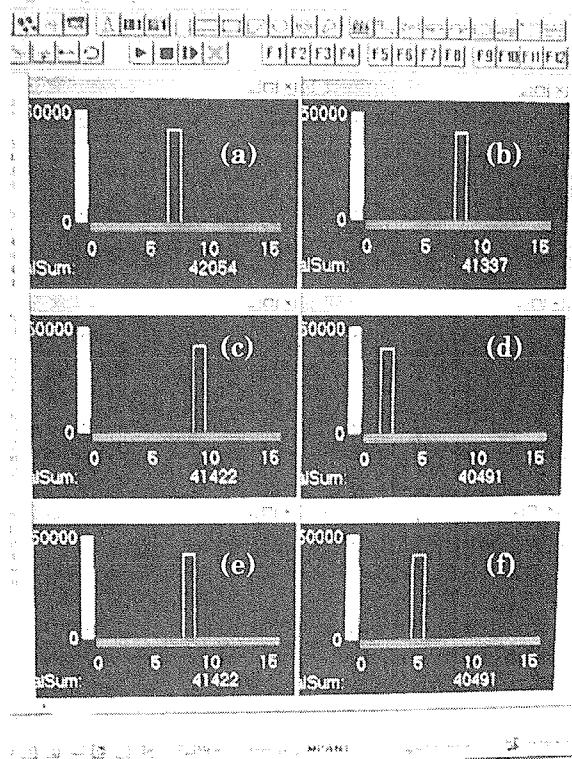


Fig. 13 Results of test simulation

(f)はそれぞれ X 軸・Y 軸の中心計算を行ったものであり、横軸がチャンネル、縦軸がカウントである。これを見れば、2点(7, 8)、(9, 2)の中心として点(8, 5)が計算されており、エンコードが正しく行われていることが分かる。そしてこれを 2次元で表したものが Fig. 13(g)である。

次に実際の中性子捕獲反応を考え、中性子が Fig. 10(b)の中心位置(7.5, 7.5)に入射するとする。プロトンとトリトンは、Fig. 10(a)に示すように等方的に放出される。この場合、Fig. 14に示すように、 θ の散乱角、 ϕ (Fig. 14で y 軸方向を 0 とする) の方位角の微小立体角 $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$ の方向にプロトンが放出されたときにヒットするストリップは、例えば、Fig. 14で $\theta = 30$ 度、 $\phi = 45$ 度の場合、波高弁別レベルの取り方によって多少変わってくるが、だいたい X 軸・Y 軸とも 6~10 チャンネルである。そして、これらを全立体角について調べ、放出割合を考慮し、それをプログラミングにより Spartan II でパルスを発生させることによって、実際の中性子照射によって得られる位置情報を得ることができる。その結果は Fig. 15(a)のようになった。そして、Fig. 15(b)-(d)は Fig. 15(a)をそれぞれ $y=6, 7, 8$ でスライスしたものである。1つのチャンネル幅が $400 \mu\text{m}$ に相当するので、このシミュレーションで得られた位置分解能は 1.6mm 程度であることが分かる。

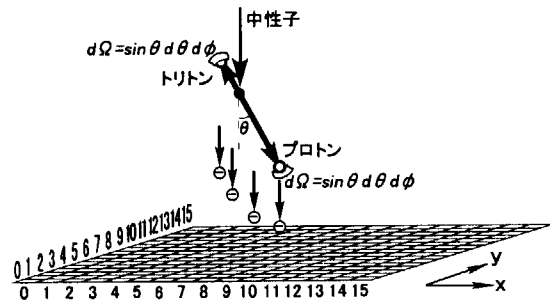


Fig. 14 Schematic view of scattering angle of a proton and a triton

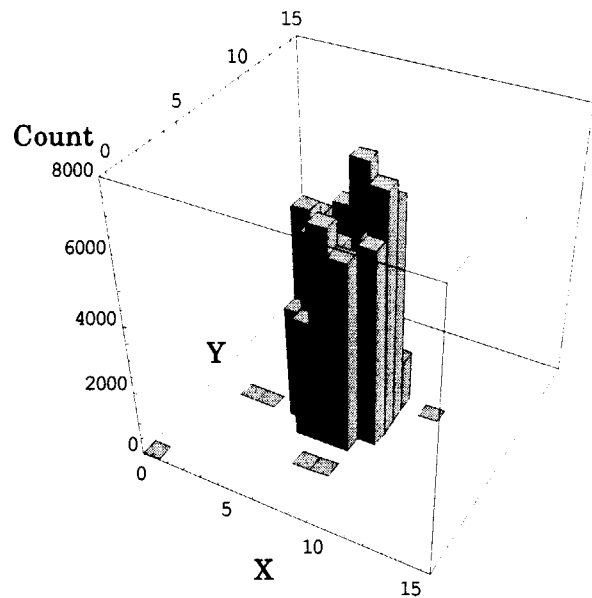


Fig. 15(a) Result of the simulation.

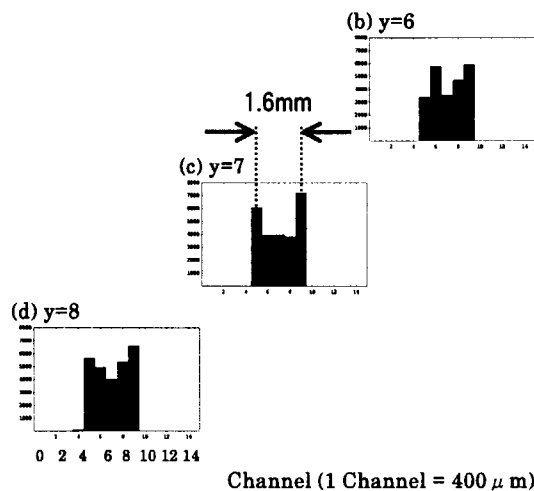


Fig. 15(b)-(d) Cross section of Fig. 15(a) at $y=6,7,8$.

6. 結論

大強度陽子加速器施設で使用する 2次元中性子検出器として開発している MSGC の開発の現状を、エンコードボードを中心に述べた。実験については、3 気圧 He(90%)+C₂H₆(10%) の混合ガスで中性子照射実験を行った結果、信号とノイズを波高により弁別でき、ガスゲイン 20 を得た。また、この混合ガス中でのプロトンとトリトンの飛程はそれぞれ 9.5mm, 3.0mm であった。

そして、エンコードボードに関しては、10 気圧 He(90%)+C₂H₆(10%)の混合ガスでヘリウム 3 による中性子捕獲反応を模擬してパルスを入力したところ、このガス条件ならば現在のシステムでは 1.6mm の位置分解能となることが分かった。現在世界で使用されている中性子用 MSGC で得られる位置分解能は高々 1~2mm 程度であるので、このシステムで最高水準の位置分解能が確実に得られることが分かった。

今後の展望としては、シミュレーションにより上記のガス条件で 1.6mm の位置分解能が得られることが分かったので、実際に中性子を入射して一連のシステムを使用して信号を取り込み、位置検出を行い、それを実験によって証明する。そして、ガス条件を変えて更に高い位置分解能を目指す。次の段階としては、高計数率・高効率を得るためのシステムについての検証をする。また、更に位置分解能を上げるにはトラックがヒットする全ストリップの様子を読みとり、プロトンとトリトンの波高を丁寧に調べていく必要がある。

謝辞

中性子科学全般についてご教授下さった新井正敏グループリーダー、3号炉でポートを提供して下さった大強度陽子加速器施設開発センター・松林政仁氏、相澤一也氏、検出器全般についてご教授下さり、実験装置を貸して下さった先端基礎研究センターの片桐政樹氏、エレクトロニクス関連でご教授下さった工作技術課の美留町厚氏、海老根守澄氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) A. Oed: Nucl. Instr. and Meth. A, 263, 351, (1988).
- 2) A. Oed: Nucl. Instr. and Meth. A, 367, 34, (1995).
- 3) T. Tanimori, A. Ochi, S. Minami and T. Nagae; Nucl. Instr. and Meth. A, 381, 280, (1996).
- 4) 越智敦彦、谷森達、西勇二、青木俊介、西泰朗 : Vol.25, No.1, (1999).
- 5) N. Vellettaz, A. Oed; Nucl. Instr. And Meth. A, 392, 73, (1997).
- 6) V. Mack, K. Bernier, J.M. Brom, J.C. Fontaine, D. Huss, F. Jeanneau, J.P. Schunck and C. Voltolini; Nucl. Instr. and Meth. A, 413, 293, (1998).
- 7) 正岡聖、中村龍也、山岸秀志、曾山和彦、“ガドリニウムコンバータの中性子2次元検出型マイクロストリップガスチェンバーへの最適化”、JAERI-Research2002-003, February, (2002).
- 8) H. Sakurai; Nucl. Instr. and Meth. A, 374, 341, (1996).

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	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
線量当量	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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² 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のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

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 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/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

中性子散乱実験用マイクロストリップガスチエンバーの開発 — エンコードボードの開発とシミュレーション —

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています