



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

2002年2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, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

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ャンバーへの最適化

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究中心
正岡 聖・中村 龍也・山岸 秀志・曾山 和彦

(2002 年 1 月 22 日受理)

大強度陽子加速器計画における強力パルス中性子ビームを用いた散乱実験用の 2 次元中性子検出器(マイクロストリップガスチャンバー:MSGC)の開発が行われており、この検出器では、高い計数率・検出効率・位置分解能、動作安定、大面積化が求められている。本研究では MSGC のコンバータとしてのガドリニウムの適正を検証するため、まず 0 次元中性子検出器を用いた簡単な実験を行って検出効率を求めることによって、ガドリニウムコンバータの基本特性を調べた。更にシミュレーションによって、MSGC でのキャピラリープレート配置に関する最適化を行った。その結果、理論上はガドリニウムが MSGC のコンバータとして使用することが可能であることが分かった

Optimization of Micro-strip Gas Chamber as Two-dimensional Neutron Detector
using Gadolinium Converter

Sei MASAOKA, Tatsuya NAKAMURA, Hideshi YAMAGISHI and Kazuhiko SOYAMA

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

(Received January 22, 2002)

A micro-strip gas chamber (MSGC) has been developing as a two-dimensional position sensitive neutron detector for neutron scattering experiments using high-intensity pulsed-neutron source in a high-intensity proton accelerator facility. MSGC is required for the high count rate, high detective efficiency, high positional resolution, stabilization and covering large area. Our purpose in this paper is to verify the proper of Gadolinium as MSGC converter. First, the basic property of Gadolinium converter was examined by simple experiments using a zero-dimensional neutron detector on the purpose of deriving the detective efficiency. Second, the optimization of the arrangement of a capillary plate in MSGC has been done by simulation on the MSGC using Gadolinium converter. As a result of that, it has been proved that Gadolinium can be theoretically used as a converter of MSGC.

Keywords: Micro-strip Gas Chamber, Two-dimensional, Neutron Detector, Converter, Helium-3, Gadolinium, Capillary Plate

目 次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. マイクロストリップガスチェンバー(MSGC) | 1 |
| 2.1. 構造および中性子検出原理 | 1 |
| 2.2. 中性子コンバータ | 2 |
| 2.2.1. ヘリウム-3 | 2 |
| 2.2.2. リチウム-6 | 3 |
| 2.2.3. ポロン-10 | 3 |
| 2.2.4. ガドリニウム-157 | 3 |
| 2.3. ガドリニウムコンバータの転換電子の検出効率 およびエネルギースペクトルの計算 | 4 |
| 3. 0次元検出器を用いた中性子検出実験 | 4 |
| 3.1. 検出器・試料・線源 | 4 |
| 3.2. ヨウ化セシウム | 5 |
| 3.3. 実験方法および実験結果 | 5 |
| 4. キャピラリープレート配置のシミュレーション | 6 |
| 4.1. 計算方法 | 6 |
| 4.1.1. 転換電子 | 6 |
| 4.1.2. 即発 γ 線によるコンプトン電子 | 8 |
| 4.2. シミュレーションの結果 | 9 |
| 5. 結論 | 10 |
| 謝辞 | 11 |
| 参考文献 | 11 |

Contents

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Micro-strip Gas Chamber (MSGC) | 1 |
| 2.1. Structure and Detection Principle | 1 |
| 2.2. Neutron Converter | 2 |
| 2.2.1. Helium-3 | 2 |
| 2.2.2. Lithium-6 | 3 |
| 2.2.3. Boron-10 | 3 |
| 2.2.4. Gadolinium-157 | 3 |
| 2.3. Calculation of Detective Efficiency and Energy Spectrum of Conversion Electron from Gadolinium Foil | 4 |
| 3. Experiments of 0-dimension Neutron Detector | 4 |
| 3.1. Detector, Sample and Source | 4 |
| 3.2. Iodation Cesium | 5 |
| 3.3. Experimental Methods and Results | 5 |
| 4. Simulation on the Arrangement of the Capillary Plate | 6 |
| 4.1. Calculation Method | 6 |
| 4.1.1. Conversion Electrons | 6 |
| 4.1.2. Compton Electrons from Prompt Gamma Ray | 8 |
| 4.2. Results of Simulation | 9 |
| 5. Conclusion | 10 |
| Acknowledgment | 11 |
| References | 11 |

1. はじめに

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構との共同計画として行われている大強度陽子加速器計画では、より大きなパワーを持った加速器が建設されており、物質・生命科学、長寿命核種の核変換処理、原子核・素粒子の各研究施設で研究が行われる。その内の物質・生命科学実験施設における中性子散乱実験で得られる中性子強度は、検出器位置で最大 10^6 cps/mm^2 に達すると予想され、既存の中性子検出器では対応できない。そこで、我々は高速・高効率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(MSGC)の開発を行っている。

MSGC は、半導体微細加工技術を応用したワイヤレス型比例計数管であり、基盤上に配列したアノードとカソードの距離が短いことから、高速高計数率動作が可能となる。MSGC は約 10 年前よりフランス ILL を中心に開発されてきたが、日本原子力研究所での利用を目的とした高速・高位置分解能に対応したものは開発されていない。

現在我々が開発中の MSGC を用いた2次元検出器の中性子コンバータとしては、ヘリウム・3 とガドリニウムを考えている。 ${}^3\text{He}$ ガスの場合は、ガンマ線弁別が容易にでき、高い検出効率が得られるという利点がある。一方ガドリニウムの場合は、薄膜化できるので Time of Flight の実験において気体よりも高いエネルギー分解能が得られることと、中性子捕獲断面積が非常に大きいので他の固体コンバータ(Li, B など)よりも高い検出効率が期待できるということが挙げられる。しかしながら、中性子捕獲反応で生じる転換電子とバックグラウンドノイズとなる γ 線との弁別が困難なため、実際にガドリニウムコンバータの中性子検出器で散乱実験をした例はいまだ報告されていない。そこで、実際に実験によってガドリニウムコンバータの基本特性を確かめるため0次元検出器で中性子のスペクトルを測定して、検出効率を求めた。更にシミュレーションによって MSGC でガドリニウムコンバータとキャピラリープレートの距離と γ/n 比の特性を計算して最適化を行い、ガドリニウムコンバータの適応の可能性について検討したので報告する。

2. マイクロストリップガスチェンバー (MSGC)

2.1. 構造および中性子検出原理

MSGC はフランスの Oed¹⁾によって 1988 年に考案されたものであり、2 次元位置感応型 X 線検出器として利用してきたが、近年中性子検出用に開発されている^{2,3)}。Fig. 1 には我々が設計中の MSGC の原理図を示す。但しこれはガドリニウムコンバータを使用する場合であり、ヘリウム・3 ガスを使用する場合は薄膜を配置するかわりに ${}^3\text{He}+\text{CH}_4$ の混合ガスを充填する。ガスは容器内封じ込め型とし、ガドリニウムコンバータの場合は 1 気圧弱、3-ヘリウムガスを使う場合は 7 気圧程度である。

中性子検出はコンバータとの捕獲反応の際に放出される電子、 α 粒子、陽子を検出することで行う。放出されたこれらの荷電粒子はガスを電離し、多数の信号電子を形成する。それらの電子は電界により、キャピラリープレートなどの前段ガス増幅器に達し、そこで増幅され、

MSGC 基盤に到達する。MSGC 基盤では、アノードでの電子なだれで生成した電子がアノードに、陽イオンがカソードに取り込まれることによって、信号として検出される。マルチワイヤー型比例計数管 (MWPC) では芯線近傍の電子なだれで生じた陽イオンのドリフト速度 ($\sim 10^5 \text{ mm/s}$) は電子のドリフト速度 ($\sim 10^8 \text{ mm/s}$) に比べて非常に遅いため、陽イオンが芯線付近で飽和し、これがなだれ現象の妨げとなり、ゲインの低下を引き起こして動作が不安定になる。一方、MSGC ではアノードとカソードの距離がわずか $45 \mu\text{m}$ であるため、電子なだれで生じた陽イオンはすぐにカソードに吸収され、高計数率を保つことができる。キャピラリープレートは鉛ガラスでできており、厚さ 1mm 、直径 $100 \mu\text{m}$ のホールが開口率 50%で開いている。MSGC 基盤だけならば数 10 度のガス増幅しか得られないが、キャピラリーアンプ表裏面間に約 1000V 程度の電圧をかけることによって、1000 以上の増幅率を得ることが可能である。

基盤の大きさは、最終的には $20 \times 20\text{cm}^2$ の面積を目標としている。MSGC は信号線としてワイヤーの代わりに半導体微細加工技術を用いて製作された $10 \mu\text{m}$ 幅のプレート状のアノード、 $100 \mu\text{m}$ 幅のカソード電極を交互に絶縁基板上にプリントしたワイヤレス型ガス比例計数管であり、基盤の下層にはアノード・カソードと直行するバックストリップ電極を形成しており、これによる誘導電荷を読み出すことで 2 次元位置検出を可能とする。

MSGC の開発では信号読み出しも非常に重要で、高計数率化を図るために X、Y 軸それぞれのストリップの信号の有無のみを記録する信号読み出し方式を考えている。各ストリップからの信号は、高速電流増幅器、波高弁別器によりパルス化し、デジタル処理によりその重心を求めて中性子入射位置を決定する。本方式では、デジタル処理を高速化することにより MSGC の高速性を最大限に生かすことが可能である。ちなみに X 線用では、数 $10 \mu\text{m}$ の位置分解能、 10^7 cps/mm^2 の計数率が得られている⁴⁾。

2.2. 中性子コンバータ

一般に中性子散乱実験では、位置分解能、検出効率、計数率、S/N 比のどれに重点を置くかによって、検出器の種類・コンバータが決まってくる。コンバータとしてはヘリウム-3(^3He)、リチウム(^6Li)、ボロン(^{10}B)、ガドリニウム(^{157}Gd)などを使うことができる。 ^3He はガス、 ^6Li 、 ^{157}Gd は固体、 ^{10}B については原理的にはガス・固体の両方でコンバータとして利用することが可能である。一般に、固体コンバータの方がガスに比べて中性子との核反応を起こすのに必要なコンバータ厚さをはるかに小さくできるので、高いエネルギー分解能が期待できる。これらについて順を追って説明する。

2.2.1. ヘリウム-3

^3He ガスはメタン、プロパン(C_3H_8)、フッ化炭素(CF_4)などのケンチングガスと混合して使用する。熱中性子断面積は 5330 barn 。核反応によってトリトンとプロトンが生成し、エネルギーはそれぞれ 191 keV 、 574 keV である。プロトンの ^3He 中での減衰長は $5.7\text{ bar} \cdot \text{cm}$ と、飛程が長く、位置分解能に影響するので、位置分解能を上げるためにガス圧を上げて飛程を

短くするなどの工夫が必要である。検出器には封じ込め型とガスフロー型があるが、ガス圧を上げる場合は封じ込め型である。このとき SUS や Al でできた中性子窓から中性子を真空容器内に入射することになる。中性子窓は、あまり厚くすると中性子の透過率が下がって計数率および検出効率が稼げないので厚くできないが一方、薄くしすぎると真空容器の耐圧の関係でガス圧を十分に上げることができないといった相反する問題が生じる。実際に封入可能なガス圧は機械的強度などにより制限され、7～10 気圧程度が限度である。波高弁別により、 γ 線弁別は比較的容易にできる。一般に用いられている比例計数管などでは、60～70%程度の検出効率が得られる。

2.2.2. リチウム-6

^6Li は同位体比 7.4% の ^6Li の熱中性子断面積が 940 barn で、核反応によってトリトンと α 線が生成し、エネルギーはそれぞれ 2.73 MeV、2.05 MeV である。固体コンバータとして用いられ、 γ 線をほとんど出さないので弁別に非常に優れており、高い位置分解能が得られる。従つて、固体コンバータとしてはよく用いられているが、断面積が小さいため、検出効率を上げるために ^6Li の膜厚を大きく取らなければならない。100 μm 程度が最もよく、それでもせいぜい数パーセント程度の検出効率しか得られない。コンバータに濃縮 ^6Li を使うと、理論上では熱中性子に対して 10 数パーセント、両面使うと 30% 近い検出効率が得られる⁵⁾が、コストが高く酸化性が強いなどといった問題点がある。

2.2.3. ポロン-10

^10B は同位体比 19.8% の ^{10}B の熱中性子断面積が 3840 barn で、 ^7Li と α 粒子が生成し、これらのエネルギーはそれぞれ 0.84 MeV、1.47 MeV である。一方、同時に生成する γ 線のエネルギーは 0.48 MeV であるので、 γ 線弁別が比較的容易である。固体コンバータとして使用する場合、 ^{10}B 中では α 粒子の飛程が 3.14 μm と非常に短いため厚さがとれず、効率が稼げない。 B は、古くはガス検出器として中性子検出用に使用されており、 BF_3 比例計数管は非常によく知られている。

2.2.4. ガドリニウム-157

$^{\text{nat}}\text{Gd}$ は同位体比 15.7% の ^{157}Gd の熱中性子断面積が 255,000 barn と非常に大きく ($^{\text{nat}}\text{Gd}$ でも 49,000 barn)、 $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ の核反応を起こす。まず 7937 keV もの高いエネルギー準位にまで励起され、そして 1 MeV 程度の γ 線を数本放出し、その後低いエネルギーの γ 線を放出して ^{158}Gd の基底状態に遷移する⁵⁾。その様子を Fig. 2 に示す。即発 γ 線としては 79.5 keV～数 MeV に至るまでの様々なエネルギーの γ 線を放出する。その内主なものを Table 1 に示した。即発 γ 線は 1 回の反応当たり 5.6 本、特に 500 keV 以上の γ 線は 4.45 本放出される。一方、79.5 keV, 181.9 keV の γ 線の一部は放出される代わりに高い確率で K 裂、L 裂の電子を放出し、これが転換電子となる。K 裂、L 裂の結合エネルギーはそれぞれ 50.24 keV, 7.24～8.38 keV で

あり、これらの結合エネルギーの損失分が転換電子のエネルギーとなり、29keV～180keVである。主な転換電子の放出確率、およびGd中の飛程は文献⁶⁾を参考に計算したところTable 2のようになり、1回の中性子捕獲で約80%の転換電子を放出することが分かる。これらの転換電子をまとめて検出することができれば有効なコンバータとなりうるが、 γ 線との弁別をするための工夫をしなければならない。転換電子の検出効率に関しては複数の論文で計算が行われているが、論文によって結果がまちまちであるので、実際に計算して確かめる必要がある。

2.3. ガドリニウムコンバータの転換電子の検出効率およびエネルギースペクトルの計算

Gd中の電子の減衰定数は¹⁵⁷Gdで $11.6\text{ }\mu\text{m}$, ^{nat}Gdで $12.3\text{ }\mu\text{m}$ である。Liでの α 粒子の場合も同様であるが、Gdの薄膜内部で放出された転換電子はGd原子との衝突を繰り返すのでエネルギーも粒子数も減少する。MCNP-4C(Monte Carlo N-Particle Transport Code System)で中性子がガドリニウム薄膜に入射したときに薄膜の表面から飛び出す転換電子のスペクトルを中性子入射前方面のみ、後方面のみ、および両面について、膜厚 $5\text{ }\mu\text{m}$ と $10\text{ }\mu\text{m}$ の場合について^{nat}Gdに関してそれぞれ計算したところ、Fig. 3(a), (b)のようになった。ともに50～70keV付近のものが最も多いことが分かる。また、積分を実行すれば検出効率が分かるので、^{nat}Gdと¹⁵⁷Gdの場合について膜厚 $1\sim20\text{ }\mu\text{m}$ で同様の計算を行った結果、Fig. 4(a), (b)のようになった。つまり、¹⁵⁷Gdを使えば理論的には熱中性子に対して約20%、両面使うと50%以上の検出効率が得られ、 $2, 3\text{ }\mu\text{m}$ の膜厚が最適であることが分かる。しかし、これはコストが非常に高いのであまり現実的ではない。^{nat}Gdであれば、検出効率は熱中性子に対して10数%，両面使うと20数パーセントで膜厚は $5\text{ }\mu\text{m}$ 程度が最も高い。

3. 0次元検出器を用いた中性子検出実験

ガドリニウムコンバータのMSGCへの適用の可否を議論するには、やはり実際にGd薄膜を使用した中性子検出器の実験を行うことによって基本特性を調べることが不可欠である。今回の実験では、Gd薄膜にCsIを蒸着したものを設置した0次元マルチワイヤー式検出器に中性子を照射してその検出効率を調べた。

3.1. 検出器・試料・線源

使用した検出器はガス封じ込め型である。Fig. 5に我々が設計した0次元マルチワイヤー式検出器の概念図を示す。陽極芯線には直径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ 50 mm のタングステンワイヤーを用い、4mm間隔に10本ならべ、陰極として 25 mm 角、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚の^{nat}Gd薄膜を設置した。Gd薄膜とワイヤーのギャップは 5 mm である。絶縁材にはポリスチレンを使った。中性子はSUSでできたウインドウキャップの厚さ 1 mm の部分から入射することになる。

封入ガスとしては、Ar95%・N₂5%ガスを700Torrのガス圧で使用した。また印加電圧については、上げすぎるとコネクタのセラミック部で放電を起こして転換電子(29keV～180keV)によ

る信号が検出できなくなるので、1600V 以下で行った。このときのガスゲインは α 線源によるテストでは 20 程度であった。

実験は日本原子力研究所放射線標準施設で行った。使用した中性子線源は $^{252}\text{Cf}(2\text{GBq})$ であった。 ^{252}Cf は自発核分裂によって中性子を生成するが、その収率は 0.116 n/s であるので単位時間あたり $2.3 \times 10^8 \text{ sec}^{-1}$ の中性子が放出される。一方、 ^{252}Cf は 40keV 程度の γ 線を 0.836 [1/neutron] の割合で放出する。

今回の実験では転換電子のスペクトルを測定し、検出効率を調べるために主眼をおいた。

3.2. ヨウ化セシウム

Gd が中性子捕獲の際に放出する転換電子のエネルギーは、低い上にガス中での飛程が長い。電子のアルゴン中での飛程は、一般に知られている阻止能の公式から計算でき、Fig. 6 にその計算結果を示す。このように数十 keV の電子であればその飛程は数 cm にまでおよんで有感体積を大幅に超えるため、十分に検出することができない上に、位置分解能も悪くなる。そこで、それを最小限に抑える方法として、Gd 薄膜に厚さ $1\mu\text{m}$ のヨウ化セシウム(CsI)薄膜を蒸着した^{5, 7)}。 $10\mu\text{m}$ の Gd 薄膜に中性子が入射するときに薄膜前面に放出される転換電子のエネルギースペクトルは Fig. 3(b) のように 0~180keV まで広がっている。これらの一次電子が $1\mu\text{m}$ の CsI に入射すると、エネルギーを失った一次電子とともに 10~20 個程度の各々 50eV 以下の低エネルギー二次電子を放出する^{8, 9, 10)}。

3.3. 実験方法および実験結果

測定を行った検出器の位置で ^{252}Cf からの中性子フラックスを調べたところ、1207 [cps/cm²] であった。本来ならば転換電子のみを信号として検出することが望ましい。しかし Gd からの即発 γ 線も多数放出するので、まず中性子捕獲で Gd から放出される転換電子と即発 γ 線による電子（コンプトン電子など）の和として検出することによって Gd/CsI コンバータからの転換電子と即発 γ 線の検出効率の和 $\eta_{ce+\gamma}$ を求め、そしてこの検出器の γ 線感度を測定して弁別することによって、転換電子のみによる検出効率 η_{ce} を求めるに至った。

Gd の中性子捕獲による転換電子と Gd 即発 γ 線の和としての検出効率を求める実験については以下の通りである。Cf 線源からの γ 線の影響を考慮して、そのまま検出器に中性子をあてて測定したスペクトルから、厚さ 1cm の ^6Li 板で中性子を遮蔽 (Cf からの γ 線のみ透過) して測定したスペクトルを差し引いたスペクトルを、中性子と Gd との核反応で生じた転換電子と Gd 即発 γ 線のスペクトルとみなした。Fig. 7 にその実験体系を示す。このとき得られたスペクトルが Fig. 8(a) である。印加電圧は 1300V である。

次に、Gd が中性子捕獲の際に放出する即発 γ 線と同程度のエネルギーである 1.17MeV と 1.33MeV の γ 線を放出する ^{60}Co を線源として γ 線照射によるスペクトルを測定したところ Fig. 8(b) のようになった。照射線量率は 1[mSv/h] とした。

Fig. 8 を見ても分かるように(a)と(b)の波高分布は相似しており、これらを波高弁別すること

はできなかった。また、転換電子と即発 γ 線の検出効率の和 $\eta_{ce+\gamma}$ は、Fig. 4(a)での計算より7.4%以上の値が期待されるのに対し、実験結果からは $3.7 \pm 0.2\%$ しか得られなかつた。

このような結果となった最大の原因としては、転換電子そのものの信号が小さいこと、そして今回の0次元の簡易検出器の増幅率が小さかつたために転換電子を十分に増幅することができなかつたことが考えられる。従って、キャピラリープレートなどの前段増幅器を用いて転換電子の増幅率を大きくする必要がある。しかし、Gdコンバータの場合、即発 γ 線も増幅してしまうという問題点があるので、実験のためのシミュレーションを行つた。

4. キャピラリープレート配置のシミュレーション

Gdを中性子用MSGCのコンバータに使用する場合、最も問題となるのが転換電子のエネルギーの低さと即発 γ 線である。MSGCでは2.1.節でも述べたようにGdコンバータとMSGC基盤の間にキャピラリープレートなどの前段ガス増幅器を設置するのであるが、Gdの場合はこのキャピラリープレートの働きが特に重要になる。

中性子との核反応でGdから出てくる転換電子の内一次電子はCsI薄膜を減速しながら通過し、数10keVのエネルギーでドリフト領域に飛び出す。ドリフト領域ではアルゴンガスを電離し、生成した電子がキャピラリープレートまで達する。二次電子はCsIで増幅・減速されて50eV以下の低エネルギーでドリフト領域に出てくる。そしてある程度の広がりをもってキャピラリープレートへ到達する。Dangendorf⁸⁾によれば、Gd/CsI薄膜から平均30eV程度の二次電子が10個放出される。一方、転換電子とともに79.5keV～数MeVの即発 γ 線が1反応当たり5,6本等方に放出される。この内高エネルギーの γ 線がキャピラリープレートに衝突するとコントン散乱を起こしてコントン電子を放出し、この一部がドリフト領域に飛び出す。コントン散乱は1MeVあたりで最も顕著になり、また即発ガンマのエネルギーも1MeV付近のものが多いので、ここでは1MeVの即発ガンマが1中性子当たり5,6本放出されると仮定する。また、低エネルギーの γ 線はドリフト領域でアルゴンガスに光電吸収されて光電子を放出する。これらの電子がドリフト領域のアルゴンガスを電離するため、これらすべてがキャピラリーによって増幅されてノイズとなり、転換電子の位置検出を難しくする。そこで、今回はコントン散乱のみに着目し、キャピラリープレートで生じるコントン電子による影響がどの程度のものであるのかを、電子の密度分布を計算することによって調べたのでその計算方法を示す。

4.1. 計算方法

4.1.1. 転換電子

コンバータから飛び出した転換電子の内CsI薄膜を貫通した一次電子はドリフト領域で、アルゴン原子を電離しながら進んでいく。Fig. 9にその概念図を示す。キャピラリープレート上をxy平面、中性子の入射位置を原点とする。ドリフト領域で生成した電子は電界によってキャピラリープレート上まで進む。但し、ここでは電子の初期エネルギーを60keVとする。1個の

アルゴン原子を電離して電子を生成するのに要するエネルギーは 26eV であり、一次電子の放出角は中性子の入射方向に関して軸対称であるとする。電子のアルゴンガス中の比エネルギー損失 (dE/dx) は、よく知られたベーテの式から計算できるので、これから電離によって生成する電子数を計算できる。従って、一次電子の放出角について角度積分を施すことによってキャピラリープレート上で的一次電子による密度分布を求めることができる。

一方、二次電子は、アルゴン原子との衝突、電界によって生じる広がりを考慮に入れて計算を行った。

電子とアルゴン原子との衝突断面積は電子のエネルギーを ε とすると、

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_{\text{el}}(\varepsilon) + \sigma_{\text{ex}}(\varepsilon) + \sigma_{\text{io}}(\varepsilon), \quad (1)$$

で表せる。ただし、 $\sigma_{\text{el}}(\varepsilon)$ 、 $\sigma_{\text{ex}}(\varepsilon)$ 、 $\sigma_{\text{io}}(\varepsilon)$ はそれぞれ弹性衝突断面積、励起衝突断面積、電離衝突断面積である。また、アルゴン原子間の平均距離は

$$L = \frac{1}{n^{1/3}}, \quad (2)$$

で表される。但し n はアルゴン原子の数密度である。従って、電子が距離 L 進んだときにアルゴン原子と衝突する確率は

$$\frac{\sigma(\varepsilon)}{L^2}, \quad (3)$$

で表せる。時刻 t_0 で電子が確率 $\sigma(\varepsilon(t_0))/L^2$ でアルゴン原子と衝突すると、電子は質量がアルゴン原子よりはるかに小さいので等方散乱する。ガス中を距離 L 進んだときの時刻を t_1 とすると、電子は $\sigma(\varepsilon(t_1))/L^2$ の確率でまたアルゴン原子と衝突する。そのモデルを Fig. 10 に示す。そのときの初速度を $v_0 = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ 、電子の位置を (x_0, y_0, z_0) 、要した時間を $t' (=t_1 - t_0)$ 、コンバータ・キャピラリープレート間の電場を D とする。電場の向きを z 軸にとると、時刻 t' 後の電子の速度 $v = (v_x, v_y, v_z)$ と位置 (x, y, z) は次式で表される。

$$(v_x, v_y, v_z) = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z} + \frac{eD}{m} t'), \quad (4)$$

$$(x, y, z) = (x_0 + v_{0x} t', y_0 + v_{0y} t', z_0 + v_{0z} t' + \frac{eD}{2m} t'^2). \quad (5)$$

但し、 e は電子の電荷、 m は電子の質量である。時間 t' での電子の移動距離 L を点 (x_0, y_0, z_0) と点 (x, y, z) の直線距離で近似すると、次の t' に関する 4 次方程式が導ける。

$$\left(\frac{eD}{2m}\right)^2 t'^4 + Dv_{0z} \frac{e}{m} t'^3 + v_{0z}^2 t'^2 - \frac{1}{n^{2/3}} = 0. \quad (6)$$

この 4 次方程式から、 $0 < t' \ll 1$ を満たす解が求まる。時刻 $t_1 = t_0 + t'$ での電子のエネルギーは次式で表され、これに t' を代入した結果を利用することによって $\sigma(\varepsilon(t_1))/L^2$ を計算することができる。

$$\varepsilon(t_1) = \varepsilon(t_0) + \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2, \quad (7)$$

$$= v_{0y} D e t' + \frac{e^2}{2m} D^2 t'^2. \quad (8)$$

この計算を順次繰り返すことによって、コンバータから飛び出した1個の転換電子がキャピラリープレートに到達したときの位置が分かる。今回は計算を単純化するため、転換電子同志の相互作用は無視し、この計算をモンテカルロ法で多数回実行することによって、転換電子の密度分布および広がりを求めることができた。

4.1.2. 即発 γ 線によるコンプトン電子

Gdの中性子捕獲の際に放出される即発 γ 線がキャピラリープレートでコンプトン散乱を起こしてコンプトン電子を放出し、これがドリフト領域でアルゴン原子を電離する。コンプトン電子は入射 γ 線に対して前方散乱のみ起こし、そのエネルギーは、入射 γ 線に対する散乱角 ϕ に依存する。Fig. 11にその概念図を示す。入射中性子に対する即発 γ 線の角度を ψ とする。Fig. 11からも分かるように即発 γ 線によるコンプトン散乱で様々な散乱角 ϕ (<90度)および様々な入射 γ 線の回転角方向にコンプトン電子が放出される。但し、キャピラリープレートで増幅作用を受けるのは、コンプトン電子がドリフト領域に散乱されたとき、すなわち散乱角が $\phi_{\min} < \phi < 90$ 度(ϕ_{\min} :入射 γ 線とコンプトン電子を同一平面内にとったときの γ 線とキャピラリープレートとのなす角)のときであり、 ϕ_{\min} に関してはコンプトン電子の放出される入射 γ 線に対する回転角方向によって異なる。

コンプトン電子の初期エネルギー E_0 は、一般によく知られたコンプトン散乱の式から以下のように計算される。

$$E_0 = h\gamma \frac{\frac{h\gamma}{mc}(1-\cos\theta)}{1+\frac{h\gamma}{mc}(1-\cos\theta)} \quad (9)$$

但し、 $h\gamma$ は入射 γ 線のエネルギー、 c は光速である。このとき、 θ は散乱 γ 線の散乱角であり、 θ と ϕ の間には以下の関係式が成り立つ。

$$\cot\phi = \left(1 + \frac{h\gamma}{mc^2}\right) \tan\frac{\theta}{2} \quad (10)$$

これよりコンプトン電子の散乱角に対するその初期エネルギー $E_0(\phi)$ が計算できる。一方、微分散乱断面積 $d\sigma/d\Omega$ に対するクライン・仁科の式と式(10)から、コンプトン電子の角度分布が計算できる。1MeVの γ 線がコンプトン散乱を起こす場合のエネルギーおよび散乱の角度分布をそれぞれFig. 12(a), (b)に示す。コンプトン電子の角度分布は、その散乱角が90度付近で、低エネルギーのものが多いことが分かる。このように散乱角 ϕ によってコンプトン電子の密度もエネルギーも異なってくる。

散乱角 ϕ で微小立体角 $d\Omega$ に放出されるコンプトン電子は、アルゴンガス中では1つのアルゴン原子を電離するのに約26eVのエネルギーを消費して電子を生成する。生成した電子は電場によってキャピラリープレートに到達する。コンプトン電子のアルゴンガス中の比エネルギー損失 (dE/dx) も、よく知られたペーテの式から計算できるので、生成した電子数が計算できる。今の場合、やや複雑であるので、簡単に説明する。

Fig. 13に角度 ψ で放出された γ 線がキャピラリープレートでコンプトン散乱を起こし、散乱角 ϕ でコンプトン電子が放出される場合の概念図を示す。このとき、コンプトン電子は入射 γ

線の方向を軸とした円錐の面に沿って飛び出す。従って、同じ初期エネルギーでもコンプトン電子の入射 γ 線回転軸に対する放出方向とキャピラリープレートとのなす角度によって、キャピラリープレート上に到達する電子密度は異なってくる。コンバータ・キャピラリープレート間のドリフト領域を距離 r 進んだときにガス中で生成する電子はFig. 13(a)に示された円錐の底円の内ドリフト領域の部分をxy平面(キャピラリープレート上)に投影した位置までドリフトすることになる。すると、Fig. 13(b)に示すようにその投影図は橿円の一部(実線)になり、底円上の点A, Bは橿円上の点A', B'に投影され、角度 $\alpha(\angle AOB)$ も角度 $\alpha'(\angle A'O'B')$ に投影される。点A'もしくは点B'の座標は次に示すxy平面上の橿円の公式

$$\frac{x^2}{(r \sin \phi \cos \phi)^2} + \frac{y^2}{(r \sin \phi)^2} = 1. \quad (11)$$

を使って計算できるので、x座標とy座標が分かる。z座標に関しても同様にyz平面上に投影することによって求めることができる。

キャピラリープレート上での電子の密度分布を求めるには、このxy平面上での密度分布を立体角 Ω で積分し、更に即発 γ 線の放出角度に関して角度積分を施せばよい。また、Fig. 11から密度分布は原点対称となることが容易に分かる。

4.2. シミュレーションの結果

計算は中性子がガドリニウム薄膜上の同一の点で100,000回核反応を起こしたとして、キャピラリープレート上での電子密度を計算した。分布は原点対称なので、原点を通る断面で表せる。また、ガドリニウム薄膜の厚さは $5\mu\text{m}$ とし、 $1\mu\text{m}$ のCsIを蒸着しているとする。

キャピラリープレート上でのコンプトン散乱においては、計算を単純化するため、キャピラリープレートのホールを無視し、鉛(Pb)とガラス(SiO₂)が1:6程度の割合で構成されているとして1MeV γ 線のコンプトン効果による線減衰定数を 0.3 cm^{-1} とした。また、コンバータ・キャピラリープレート間の電圧は400Vである。従って、4.2.1節で議論したドリフト領域での電場 D は、コンバータ・キャピラリープレート間の距離 d を使って、 $D=400/d$ で表される。

d をパラメータにとって電子密度を計算した結果がFig. 14である。横軸がキャピラリープレート上の原点からの距離、縦軸が 0.01mm^2 あたりの電子の個数である。図を見れば分かるように、どの場合も転換電子としては一次電子による電子密度が最も大きく、 d が大きくなると一次電子の裾が拡がり、それ自身によるノイズレベルが高くなる。二次電子は信号レベルが非常に低く、コンプトン電子と同程度である。コンプトン電子は d が小さいときは原点付近に集中してノイズレベルが高いが、 d が大きくなると、分布が拡がりノイズレベルは一次電子自身によるノイズレベルよりも低くなる。そして、 d をパラメータにとったときの位置分解能と γ/n 比を求めたところ、Fig. 15のようになった。位置分解能は $d=0.5\text{mm}$ のとき最もよく $500\mu\text{m}$ 程度であった。 γ/n 比は $d=0.5\text{mm}$ で 7×10^{-2} 、 $d=5\text{mm}$ で 5×10^{-2} と、 d が大きいほどわざかながらよくなるという傾向を示しているが、ほぼ同程度である。しかし、Fig. 14からわかるように、 $d=2\text{mm}$ 以上になると、一次電子の分布の裾が拡がり、コンプトン電子よりも一次電子それ自身によるノイズレベルが高くなっているので、そのピーク値とノイズレベルとの比は d が

大きくなるとむしろ悪くなっていると思われる。

5. 結論

ガドリニウムをコンバータに用いたマイクロストリップガスチェンバーが中性子散乱実験用の2次元検出器として使用できるのかどうかを、コンバータとキャピラリーの距離を変化させてそれぞれの位置分解能、 γ/n 比を求めることで検証し、最適化を行った。

中性子捕獲によるガドリニウムからの転換電子と即発ガンマ線を弁別する方法としてガドリニウムコンバータ・キャピラリープレート間の距離 d を短くすることが挙げられる。その理由は、即発ガンマ線がキャピラリープレートとのコンプトン散乱で放出するコンプトン電子が有感体積内でアルゴン原子との衝突で電離を起こす割合が減少する上に転換電子の位置分解能が上がるためである。シミュレーションの結果としては、転換電子の内 CsI 薄膜を通りぬける一次電子の影響が最も大きく、キャピラリープレート上での位置分解能は $d=0.5\text{mm}$ のとき $500\text{ }\mu\text{m}$ 程度で最もよい。一方、二次電子はコンプトン電子と同程度のレベルであり、信号として検出するのは難しいことが分かった。また、 γ/n 比を計算によって求めたところ $10^{-2} \sim 10^{-1}$ であまりよくないが、転換電子（一次電子）によるピークを取り出すことができた。 $d=2\text{mm}$ 以上の場合、一次電子の裾が拡がりそれ自身によるノイズレベルが高くなってしまい、実際のノイズレベルは Fig. 15 の γ/n 比よりももっと高くなるので、今回のシミュレーションでの d の最適値は 0.5mm であろう。

しかし、ガドリニウムをマイクロストリップガスチェンバーのコンバータとして使用することは不可能ではないが、転換電子の二次電子のレベルが低く、一次電子だけで検出効率、位置分解能、 γ/n 比を稼がなければならぬ状況であるので、実用化するには更なる検討が必要であると思われる。考えられる対策としては、i) 放電を考慮に入れながら d を更に短くする、ii) コンバータ・キャピラリープレート間の電圧を変化させる、iii) 封入ガスの圧力を変化させる、iv) ガドリニウムコンバータの両面から転換電子を検出する方法、コストが非常に高くなるが、濃縮ガドリニウム-157についての検討などがある。

今後はこれらの課題を実験とシミュレーションの両方から検討し、MSGC のコンバータとしてのガドリニウムに関する見解を更にはっきりさせる必要がある。また、新しい固体コンバータとしてリチウム-6についての可能性も検討していく予定である。

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、放射線標準施設での中性子検出実験でお世話して頂いた保険物理部の梶本与一氏をはじめとするスタッフの方々、MCNP-4Cについてご教授頂いた中性子科学研究センター・前川藤夫氏、勅使河原誠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) N. Vellettaz, A. Oed: Nucl. Instr. and Meth. A, 392, 73, (1997).
- 3) 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).
- 4) 越智敦彦、谷森達、西勇二、青木俊介、西泰朗：放射線、Vol.25, No.1, (1999).
- 5) B. Gebauer: Second International Workshop on Data Acquisition Systems for Neutron Experimental Facilities (DANEF-2000), Dubna, Russia, June 5-7, 2000
- 6) R.C. Greenwood, C.W. Koch, D. Breitig, O.W.B. Schult, B. Fogelberg, A. Backlin, W. Mampe, T. Von Egidy and K. Schreckenbach: Nucl. Phys. A, 304, 327, (1978).
- 7) B. Gebauer, Ch. Schulz, Th. Wilpert, S.F. Biagi: Nucl. Instr. and Meth. A, 409, 56, (1998).
- 8) V. Dangendorf, A. Demian, H. Friedrich, V. Wagner, A. Akkerman, A. Breskin, R. Chechik and A. Gibrekhterman: Nucl. Instr. and Meth. A, 350, 503, (1994).
- 9) A. Gibrekhterman, A. Akkerman, A. Breskin and R. Chechik: J. Appl. Phys., 74, 7506, (1993).
- 10) A. Akkerman, A. Gibrekhterman, A. Breskin and R. Chechik: J. Appl. Phys., 72, 5429, (1992).

Table 1 Prompt γ ray from $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ reaction

| Prompt gamma [keV] | Intensity [1/reaction] |
|-----------------------|---------------------------|
| 79.51 | 0.345 |
| 181.93 | 0.648 |
| 897.59 | 0.116 |
| 944.09 | 0.302 |
| 962.06 | 0.193 |
| 977.06 | 0.136 |
| 1107.63 | 0.159 |
| 1119.16 | 0.110 |
| 1185.99 | 0.151 |
| 1187.13 | 0.133 |
| 6750.00 | 0.098 |
| >500 | 4.45 |
| Total | 5.6 |

Table 2 Abundance and Range of conversion electron

| Energy of conversion electron [keV] | Abundance % | Range [μm] |
|---|----------------|----------------------------|
| 29.3 | 23.83 | 5.2 |
| 71.2 | 39.61 | 21.9 |
| 78.2 | 9.65 | 25.5 |
| 131.7 | 4.35 | 59.4 |
| 173.6 | 1.56 | 91.2 |
| 180.6 | 0.40 | 97.0 |

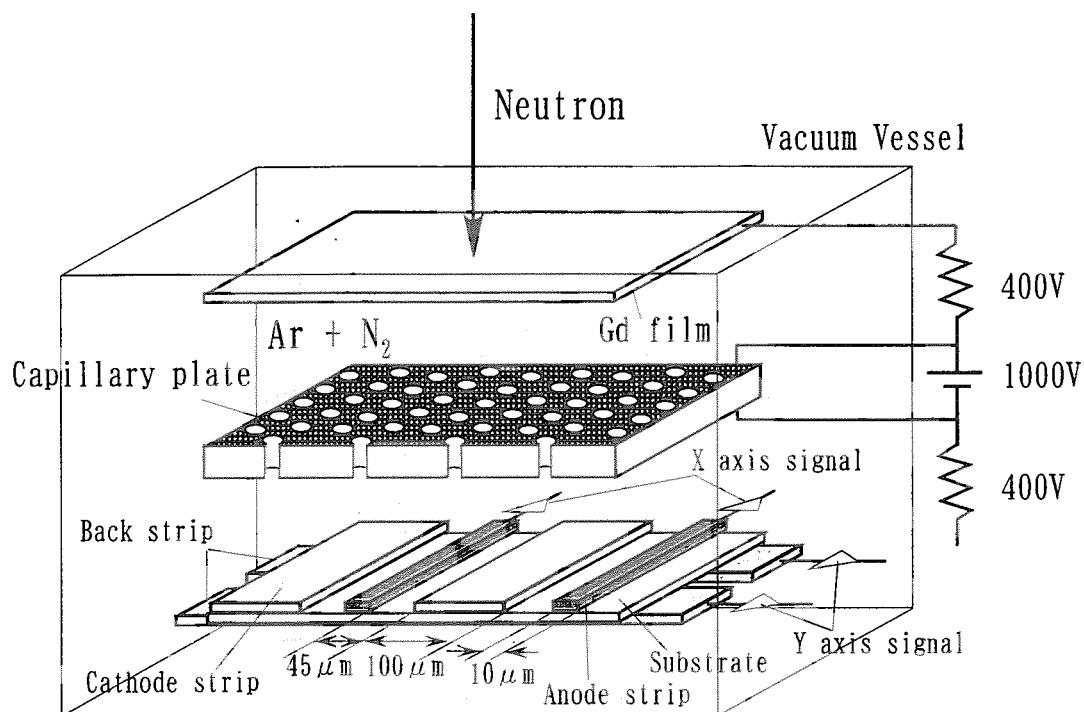


Fig. 1 Principle of the MSGC for neutron measuring using Gd film as converter.

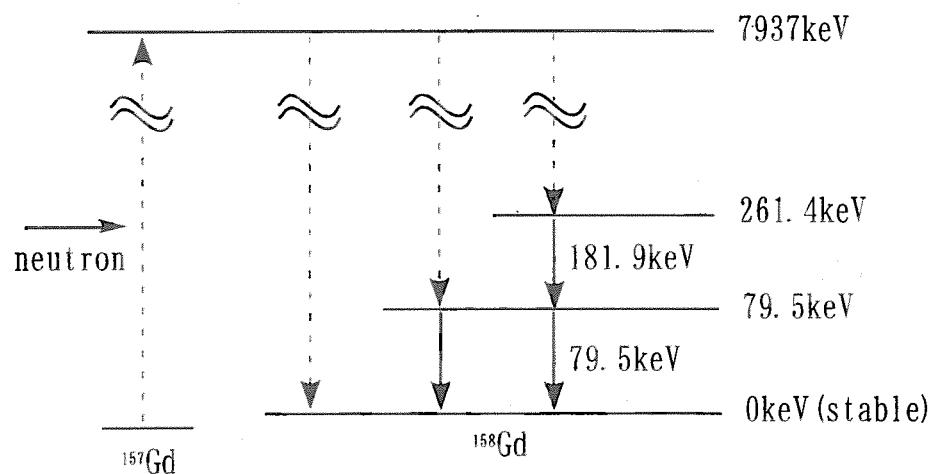


Fig. 2 Decay model of $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$

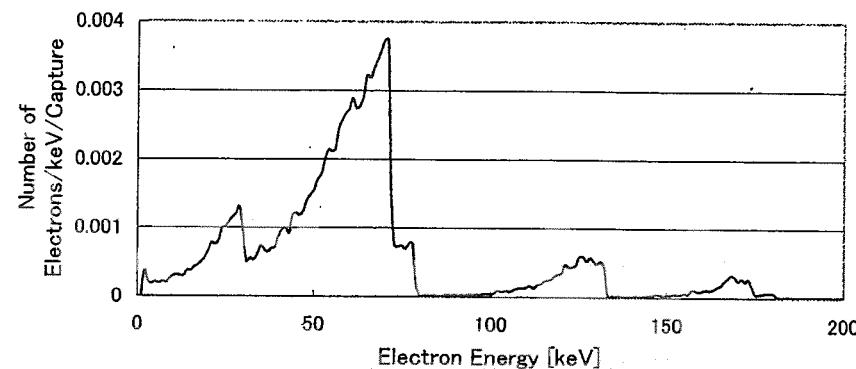


Fig. 3(a) Energy spectrum of conversion electron ($5 \mu\text{m}^{\text{nat}}\text{Gd}$)

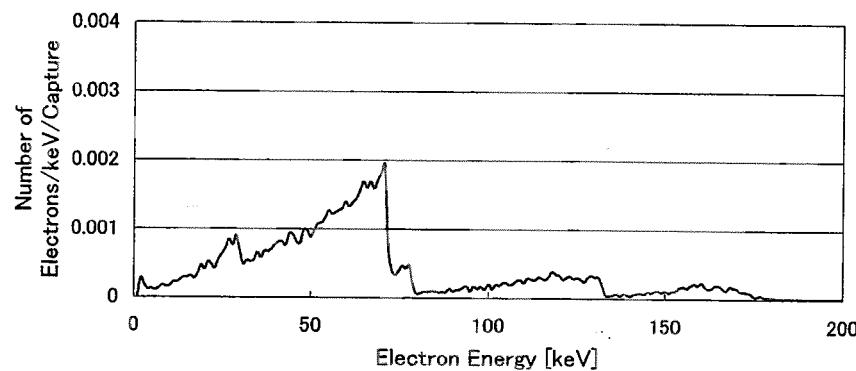


Fig. 3(b) Energy spectrum of conversion electron ($10 \mu\text{m}^{\text{nat}}\text{Gd}$)

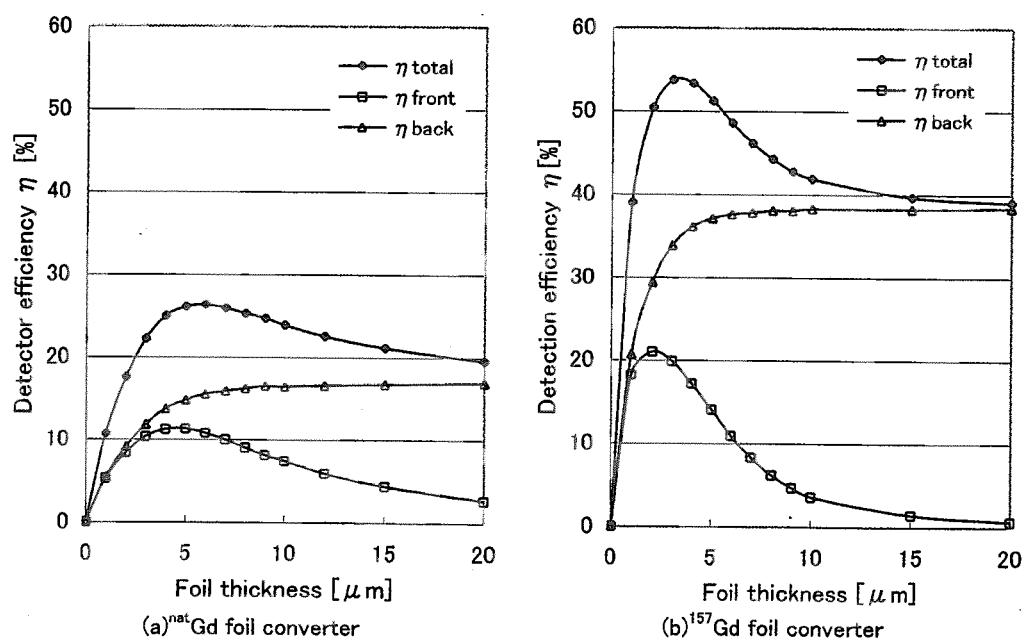


Fig. 4 Theoretical detection efficiency of thermal neutrons for Gadolinium-157 and for natural Gadolinium.

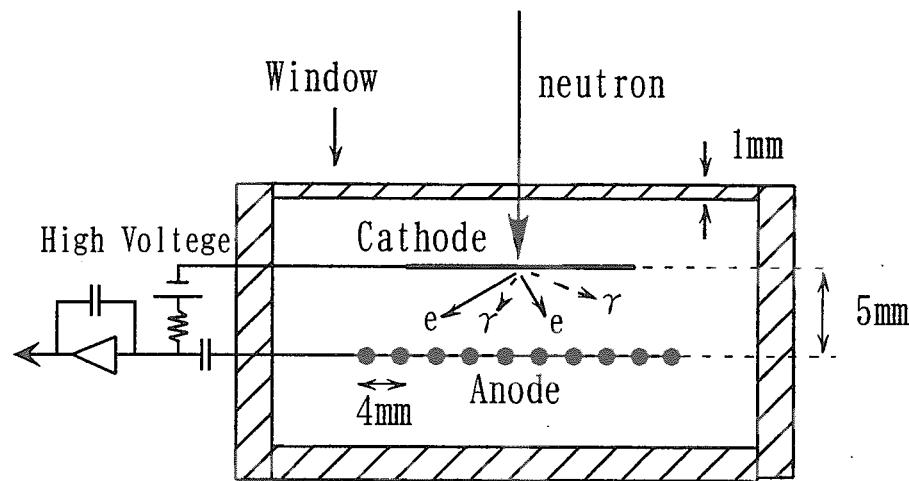


Fig. 5 Principle of the 0-dimensional neutron detector. Cathode, Gd/CsI-film ($10 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$ thickness, $25 \times 25\text{mm}^2$); Anode, $20 \mu\text{m}$ diameter x 50mm long gold-plated tungsten wire; Window, Stainless steel (1mm thickness)

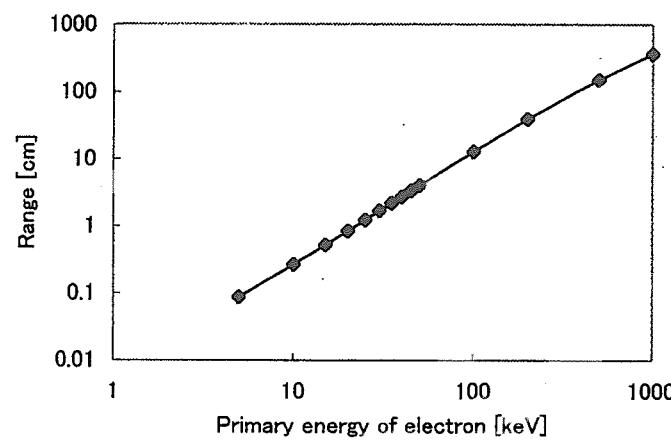


Fig. 6 Range of electrons in Ar gas

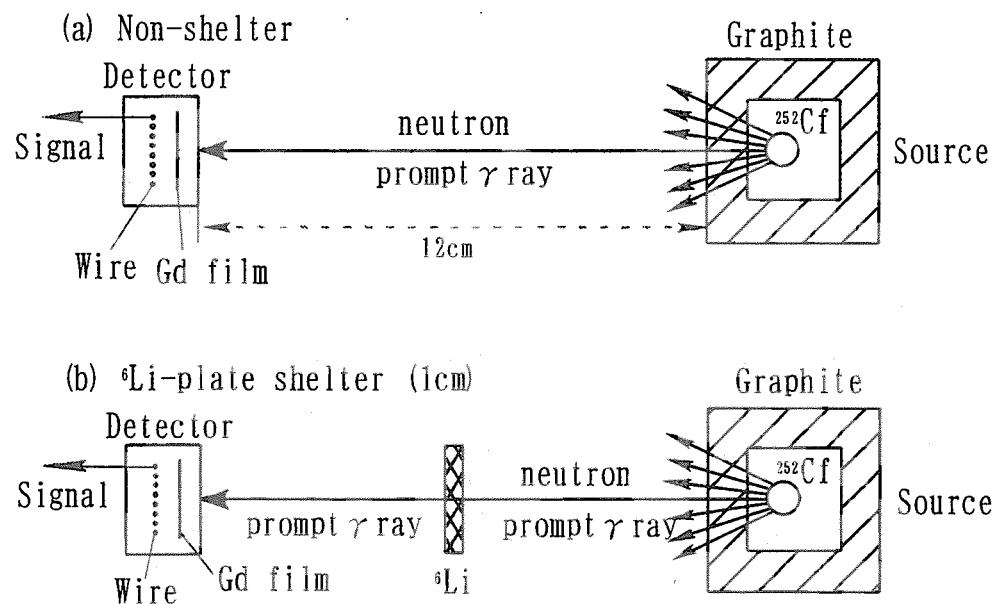


Fig. 7 Schematic view of the neutron detective experiment

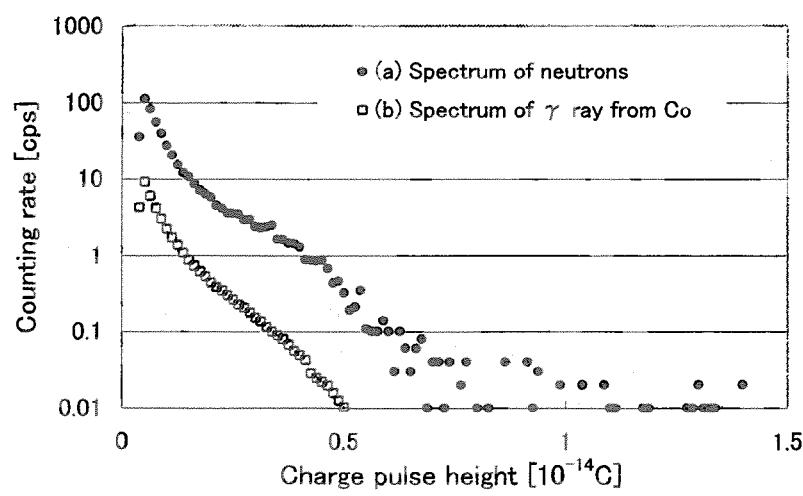


Fig. 8 Spectrums obtained by experiments

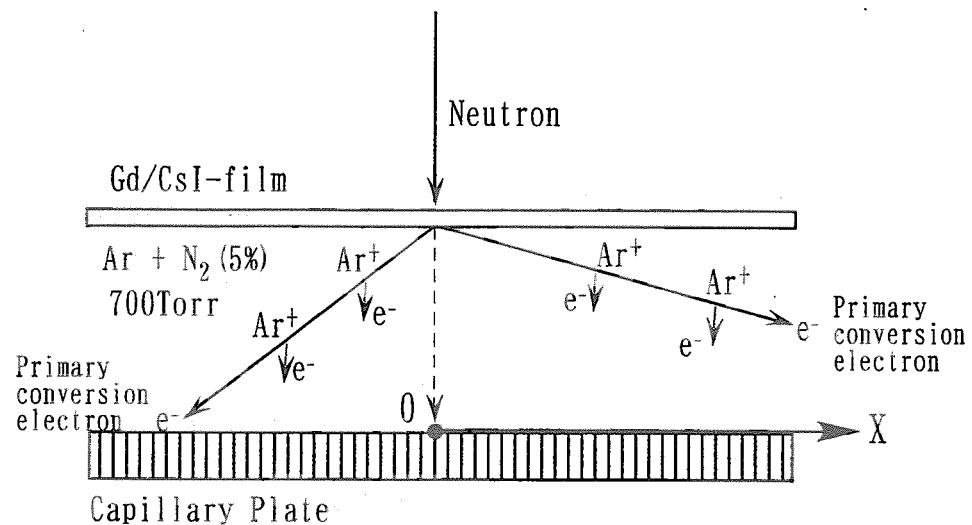


Fig. 9 Model for calculation of conversion electron (primary)

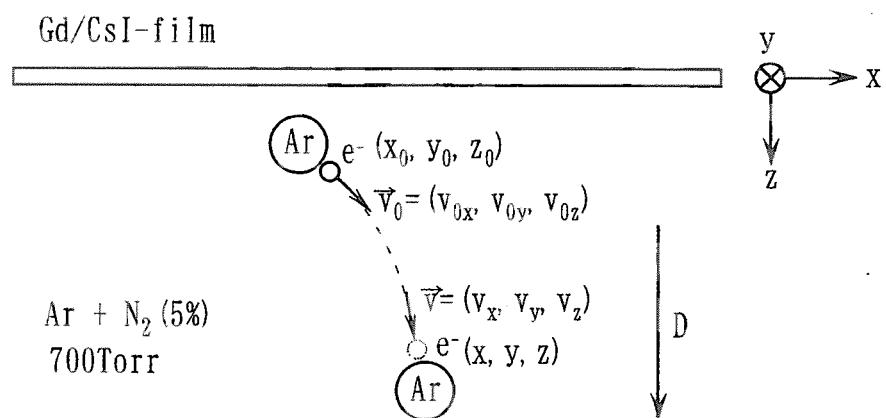


Fig. 10 Model for calculation of conversion electron (secondary)

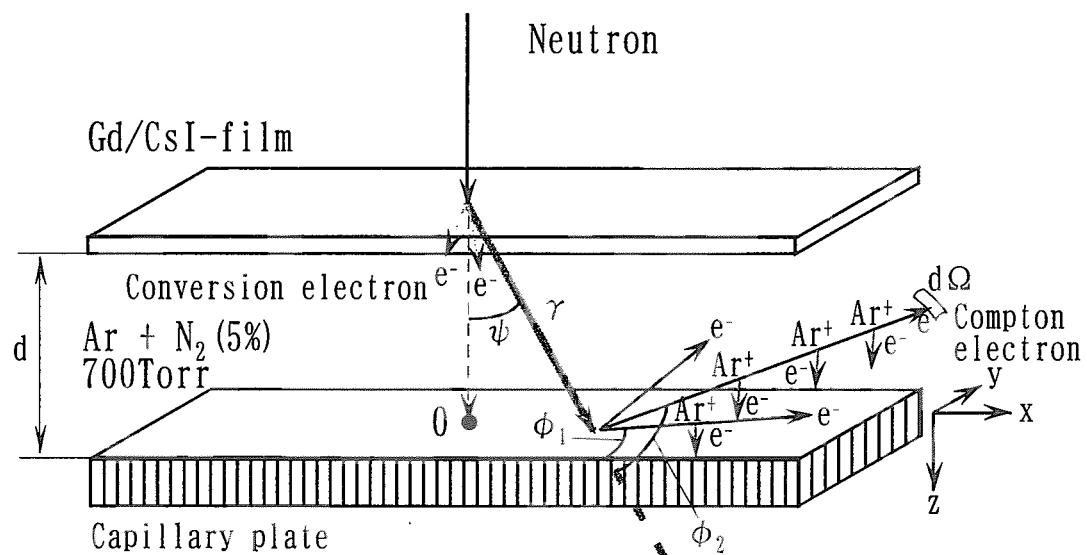


Fig. 11 Model for calculation of Compton electron

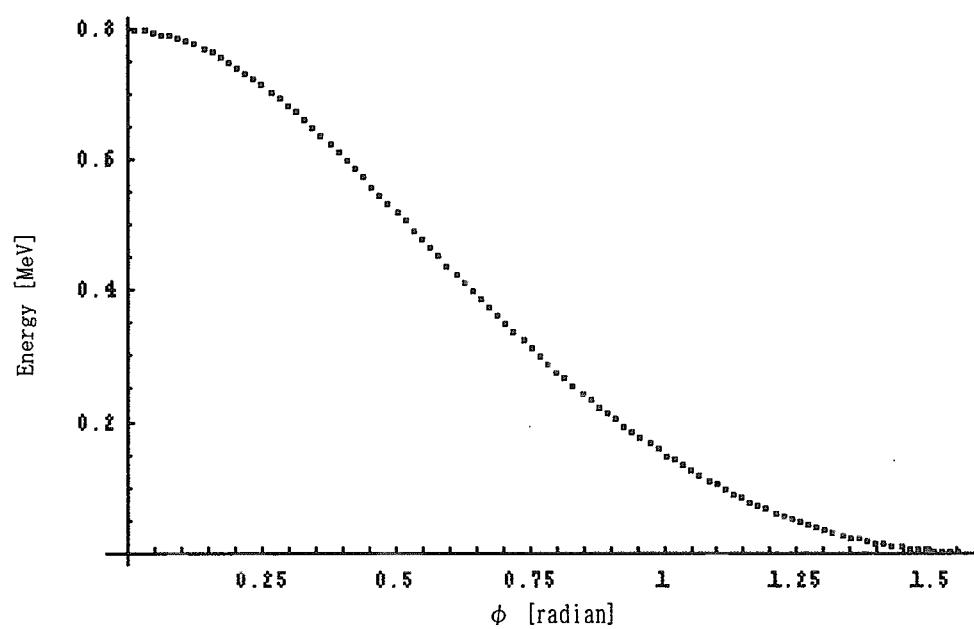


Fig. 12(a) Scattering angle distribution of energy of compton electrons

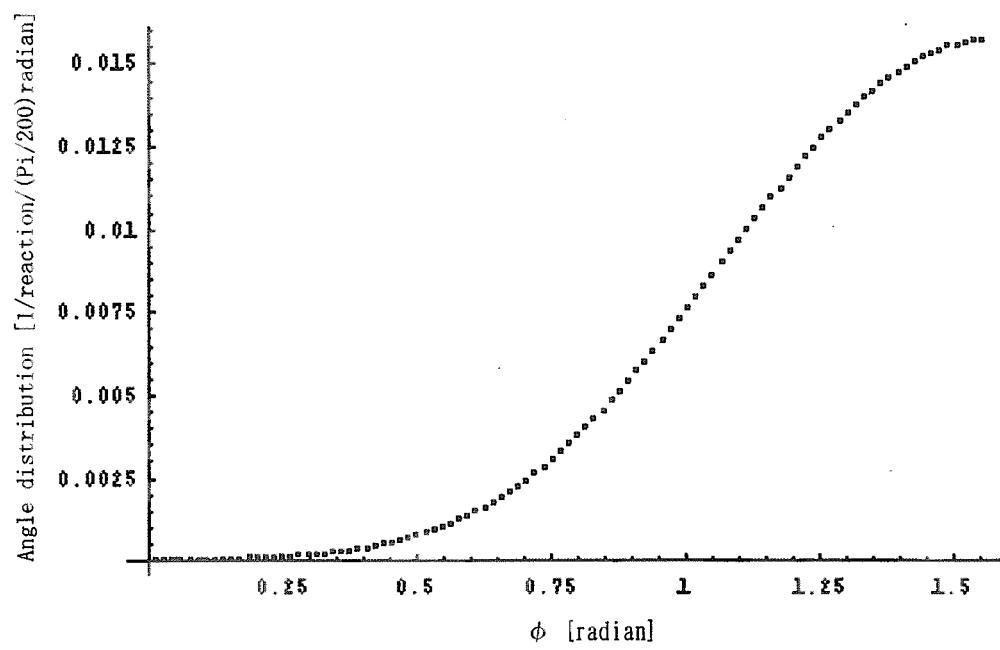


Fig. 12(b) Scattering angle distribution of compton electrons

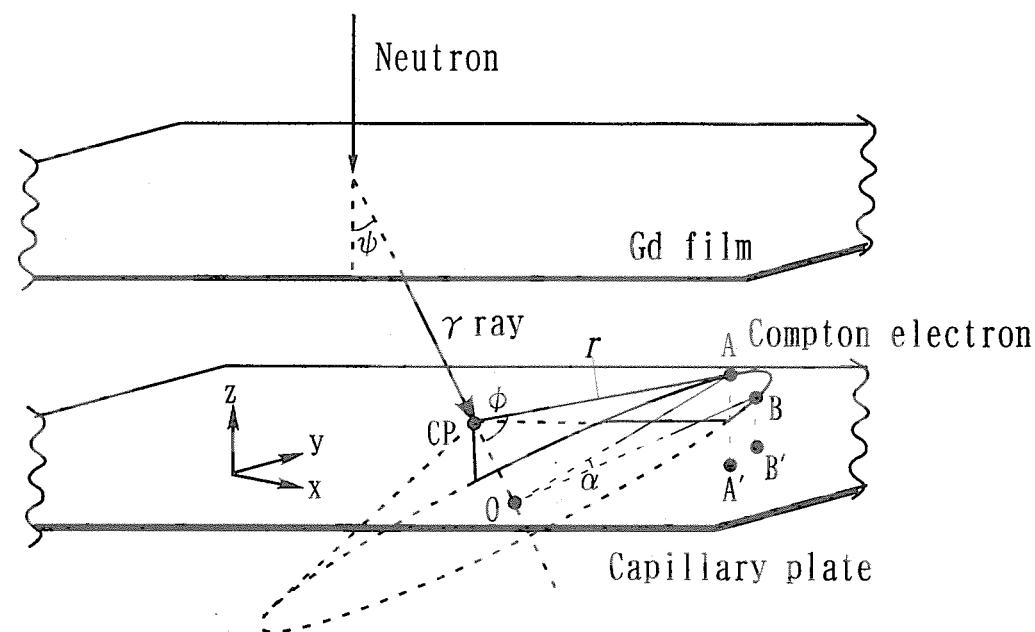


Fig. 13(a) Model for Compton scattering with scattering angle ϕ .

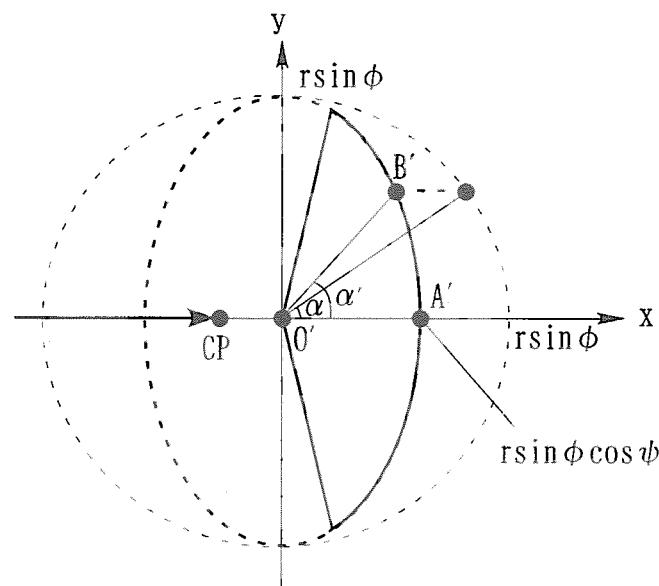


Fig. 13(b) Projected figure of Fig. 13(a) to xy plane.

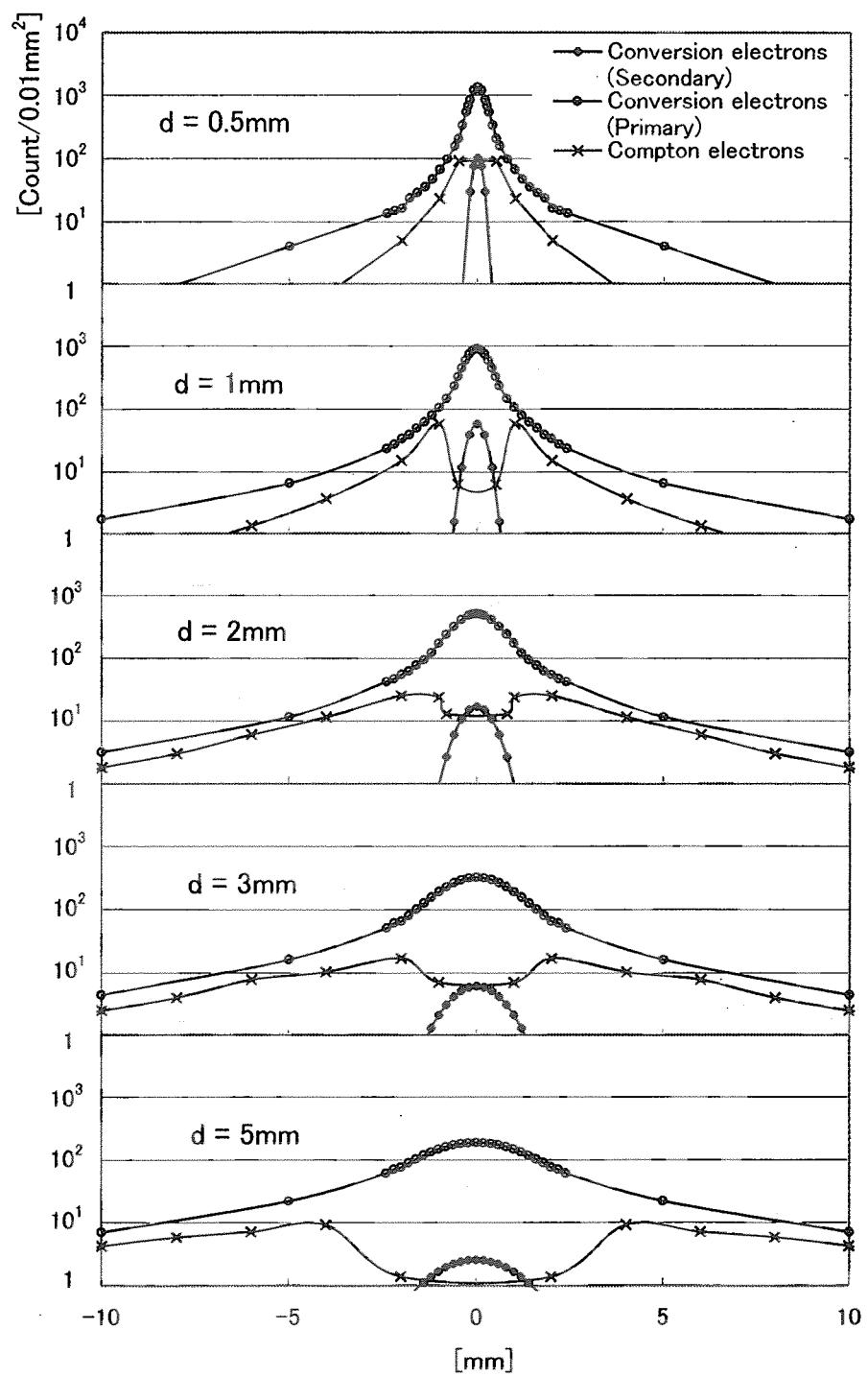


Fig. 14 Energy distribution of conversion electrons and Compton electrons on the capillary plate. d , distance between convertor and capillary.

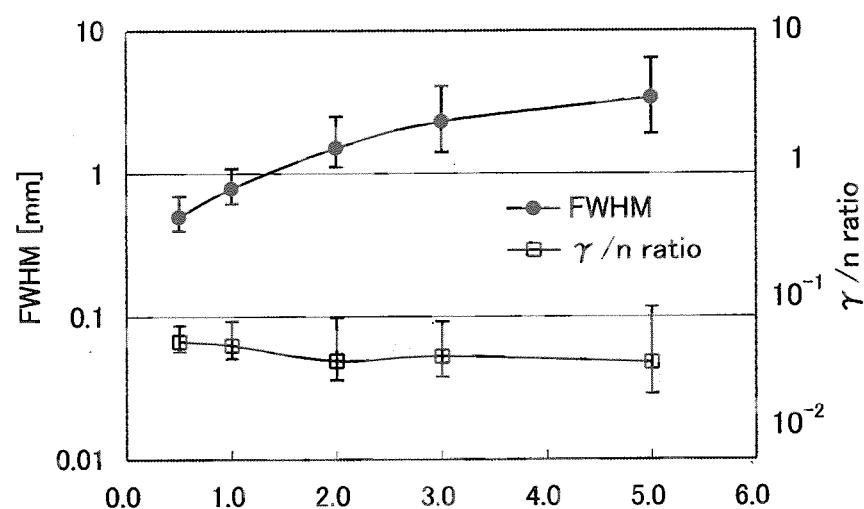


Fig. 15 FWHM and γ/n ratio vs distance between converter and capillary plate

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 |
| 圧力 | 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 |
| 功率、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 | ファラード | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンス | 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 | |
| 光束度 | ルーメン | lm | cd·sr |
| 照度 | 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 |
| トントン | 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、1eVおよび1u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、ヘクタ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規格理事会指令では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 |

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

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

| 圧力 | MPa(=10bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 力 | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062 × 10 ³ | 145.038 |
| | 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 cal = 4.18605J (計量法) |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778 × 10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813 × 10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150 × 10 ¹⁸ | = 4.184J (熱化学) |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407 × 10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487 × 10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082 × 10 ¹⁹ | = 4.1855J (15°C) |
| | 3.6 × 10 ⁶ | 3.67098 × 10 ⁵ | 1 | 8.59999 × 10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522 × 10 ⁶ | 2.24694 × 10 ²⁵ | = 4.1868J (国際蒸気表) |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279 × 10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759 × 10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272 × 10 ¹⁹ | 仕事率 1 PS(仮馬力) |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072 × 10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515 × 10 ²¹ | = 75 kgf·m/s |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616 × 10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506 × 10 ⁻³ | 1 | 8.46233 × 10 ¹⁸ | = 73.5499W |
| | 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 | |

| 放射能 | Bq | Ci | 吸収線量 | Gy | rad | 照射線量 | C/kg | R | 線量当量 | Sv | rem |
|-----|------------------------|-----------------------------|------|------|-----|------|-------------------------|------|------|------|-----|
| | 1 | 2.70270 × 10 ⁻¹¹ | | 1 | 100 | | 1 | 3876 | | 100 | |
| | 3.7 × 10 ¹⁰ | 1 | | 0.01 | 1 | | 2.58 × 10 ⁻⁴ | 1 | | 0.01 | 1 |

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

