

JAERI-Tech
2000-085



JP0150259



2次元検出型マイクロストリップガスカウンタの
中性子検出効率の計算評価

2001年 2月

山岸 秀志・曾山 和彦・金子 純一・池田 裕二郎

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開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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

2次元検出型マイクロストリップガスカウンタの
中性子検出効率の計算評価

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
山岸 秀志・曾山 和彦・金子 純一・池田 裕二郎

(2000年11月30日受理)

強力パルス中性子ビームを用いた種々の中性子散乱実験のために、高速、超高位置分解能及び高検出効率を有する2次元中性子検出器の開発が強く望まれている。それで、ヘリウム-3ガスを中性子有感物質としたマイクロストリップガスカウンタ(MSGC)の開発を進めている。

MSGC圧力容器にはヘリウム-3混合ガスが高い圧力で封入されるため、MSGCの中性子入射ウィンドウは、金属製で且つ厚い板厚を必要とする。この結果、ウィンドウにおける中性子の減衰により検出効率は低下する。電極間ギャップの拡大はより高い検出効率を与えるが、中性子エネルギー分解能及び高計数率性能を低下させる。

高い検出効率のMSGCを開発するため、圧力容器構造、ウィンドウ材料、電極間ギャップ及びヘリウム-3混合ガス圧力の最適設計と検出効率の計算評価を行った。この結果、中性子エネルギー0.1~25meVの範囲において93%以上の検出効率を有する皿形キャップ付圧力容器を持ったMSGCが開発可能であることを示した。

Evaluation of Neutron Detection Efficiencies of Micro-strip-gas-counter
as Two-dimensional Position Sensitive Neutron Detectors

Hideshi YAMAGISHI, Kazuhiko SOYAMA,
Junichi KANEKO and Yujirou IKEDA

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

(Received November 30, 2000)

The development of two-dimensional position sensitive neutron detectors that have performances of a fast response, an ultra small space-resolution and a high neutron efficiency are required for various neutron scattering experiments using very high intense pulse neutron sources. We have made a study for development of the micro-strip gas counter (MSGC) filled with helium-3 gas as a neutron sensitive material. The MSGC filled with high pressure of helium-3 gas requires a thick neutron-window that decreases the neutron detection efficiency. The MSGC with a large gap between the electrodes provides high neutron detection efficiency. However, the large gap decreases the neutron energy resolution and the response. For the development of a MSGC having high neutron detection efficiency, we have studied pressure vessel structures, window materials, electrode gaps and the pressure of helium-3 mixture gas. As a result of the studies, it was clear that the MSGC with a dish-shaped chamber can have neutron detection efficiency of more than 93% in a neutron energy range from 0.1 to 25meV of neutron energy.

Keywords: Neutron Detection Efficiency, MSGC, Helium-3 Gas, Neutron Imaging, Position Sensitive Neutron Detector, Neutron Scattering

目 次

1. 序 論	1
2. ウィンドウ材料の違いによる中性子透過率の比較	2
2.1 中性子透過率の定義	2
2.2 アルミニウムの中性子透過率	2
2.3 ステンレス鋼の中性子透過率	3
2.4 アルミニウムとステンレス鋼の中性子透過率の比較	4
3. ウィンドウ形状の違いによる中性子透過率の比較	6
3.1 熱中性子透過率の比較条件	6
3.2 平板ウィンドウ型圧力容器	6
3.2.1 熱中性子透過率の計算条件	6
3.2.2 熱中性子透過率の計算結果	7
3.3 全半球形キャップ付圧力容器	8
3.3.1 熱中性子透過率の計算条件	8
3.3.2 アルミニウムを採用した場合の熱中性子透過率	8
3.3.3 ステンレス鋼を採用した場合の熱中性子透過率	9
3.4 皿形キャップ付圧力容器	10
3.4.1 熱中性子透過率の計算条件	10
3.4.2 熱中性子透過率の計算結果	10
3.5 各圧力容器における熱中性子透過率の比較	11
4. 中性子の検出効率	12
4.1 検出効率を低下させる要素	12
4.2 平板ウィンドウ型圧力容器	12
4.2.1 検出効率のガス圧力依存性	12
4.2.2 検出効率の中性子エネルギー依存性	13
4.3 全半球形キャップ付圧力容器	14
4.3.1 中性子検出効率の計算条件	14
4.3.2 検出効率のガス圧力依存性	15
4.3.3 検出効率の中性子エネルギー依存性	15
4.4 皿形キャップ付圧力容器	16
4.4.1 中性子検出効率の計算条件	16
4.4.2 検出効率のガス圧力依存性	16
4.4.3 検出効率の中性子エネルギー依存性	17
4.5 形状が異なる圧力容器の中性子検出効率の比較	17
4.5.1 電極間ギャップ 20mm の MSGC	17

4.5.2 電極間ギャップ 40mm の MSGC -----	18
4.5.3 中性子エネルギー依存性の比較 -----	19
5. 結 論 -----	20
謝 辞 -----	21
参考文献 -----	21

Contents

1. Introduction	1
2. Comparison of the Neutron Penetration Ratios Depended on Window Materials	2
2.1 Definition of the Neutron Penetration Ratio	2
2.2 Neutron Penetration Ratio of Aluminum	2
2.3 Neutron Penetration Ratio of Stainless Steel	3
2.4 Comparison of the Neutron Penetration Ratios of Aluminum and Stainless Steel	4
3. Comparison of the Neutron Penetration Ratios for three different Window Structures	6
3.1 Conditions for Comparison of the Thermal-neutron Penetration Ratios	6
3.2 A Pressure Vessel with the Flat-shape-window	6
3.2.1 Conditions for Calculations of Thermal-neutron Penetration Ratios	6
3.2.2 Calculation Results of Thermal-neutron Penetration Ratios	7
3.3 A Pressure Vessel with the Half-ball-shape-cap	8
3.3.1 Conditions for Calculations of Thermal-neutron Penetration Ratios	8
3.3.2 Thermal-neutron Penetration Ratios of a Window Made of Aluminum	8
3.3.3 Thermal-neutron Penetration Ratios of a Window Made of Stainless Steel	9
3.4 A Pressure Vessel with the Dish-shape-cap	10
3.4.1 Conditions for Calculations of Thermal-neutron Penetration Ratios	10
3.4.2 Calculation Results of Thermal-neutron Penetration Ratios	10
3.5 Comparison of Thermal-neutron Penetration Ratios of Each Pressure Vessel	11
4. Neutron Detection Efficiency	12
4.1 Factors Making Deterioration of Neutron Detection Efficiency	12
4.2 A Pressure Vessel with the Flat-shape-window	12
4.2.1 Gas Pressure Dependency for Neutron Detection Efficiency	12
4.2.2 Neutron Energy Dependency for Neutron Detection Efficiency	13
4.3 A Pressure Vessel with the Half-ball-shape-cap	14
4.3.1 Conditions for Calculations of Neutron Detection Efficiency	14
4.3.2 Gas Pressure Dependency for Neutron Detection Efficiency	15
4.3.3 Neutron Energy Dependency for Neutron Detection Efficiency	15
4.4 A Pressure Vessel with the Dish-shape-cap	16
4.4.1 Conditions for Calculations of Neutron Detection Efficiency	16
4.4.2 Gas Pressure Dependency for Neutron Detection Efficiency	16
4.4.3 Neutron Energy Dependency for Neutron Detection Efficiency	17
4.5 Comparison of the Neutron Detection Efficiencies of the MSGC Pressure Vessels with Different Window Structures	17
4.5.1 The MSGC with an Electrode Gap of 20mm	17

4.5.2 The MSGC with an Electrode Gap of 40mm -----	18
4.5.3 Comparison of Neutron Energy Dependencies -----	19
5. Conclusion -----	20
Acknowledgment -----	21
References -----	21

1. 序 論

高速、高位置分解能型2次元中性子検出器を開発するため、ヘリウム-3(^3He)を主成分とする混合ガスを封入したマイクロストリップ型ガスカウンタ(MSGC)の検討、設計を進めている。Fig.1.1 に作動原理図としてMSGCセンサ部の概念図を示した。MSGCはX線等の低エネルギー放射線の2次元検出器⁽²⁾⁻⁽⁵⁾として既に実用化されている。中性子検出用のMSGCでは、中性子に対して大きな反応断面積を有するヘリウム-3混合ガスをチェンバ内に高圧で封入する必要があり、チェンバは金属製圧力容器として製作されることになる。このことから、高密度信号線の引き出し、中性子の位置検出分解能及び高計数率計測等に課題を持っており、現在、多くの研究機関で精力的に開発が進められている。

Fig.1.2 に中性子がMSGCによって検出される過程を模式図で示した。中性子検出用MSGCでは、チェンバ内に5~10気圧のヘリウム-3混合ガスが封入されるため、圧力バウンダリーを形成する中性子入射ウィンドウの板厚は厚くなるのが容易に予想される。この結果、中性子入射ウィンドウにおける中性子の吸収及び散乱が増加する。2次元位置検出型MSGCに入射する中性子のうち、吸収及び散乱をされずにMSGCチェンバに到達して、ヘリウム-3ガスと核反応を起こした中性子のみが有効な位置情報を持っている。ヘリウム-3ガスと核反応できなかった中性子は、チェンバを通過して、チェンバ外へ洩れることになる。例えば、ヘリウム-3混合ガス圧力を上げると、洩れ中性子が減少して検出効率は高くなるが、ウィンドウを厚くする必要が生じて、ウィンドウでの中性子透過率を低下させる。ウィンドウ金属材料を変更することによっても板厚や、中性子の吸収及び散乱断面積が変わる。このようにMSGCチェンバの検出効率は、各部品的设计条件が相互に影響を与えながら決定されている。

以上のことから、MSGCチェンバを最適構造で設計するため、圧力容器構造、中性子ウィンドウ材料、ヘリウム-3混合ガス圧力及び中性子エネルギーをパラメータに検出効率を計算し、比較評価した。

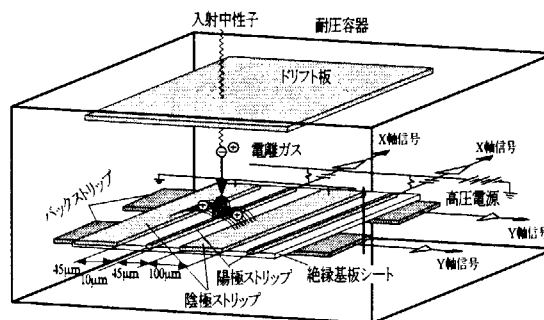


Fig.1.1 Principle of the MSGC as a two dimensional neutron detector.

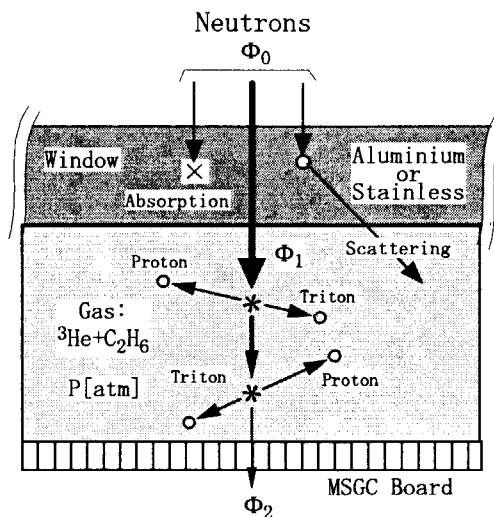


Fig.1.2 Schematic diagram for detecting neutrons by using an MSGC.

2. ウィンドウ材料の違いによる中性子透過率の比較

MSGCチェンバにおける中性子入射ウィンドウの中性子透過率を計算し、評価した。計算パラメータには、ウィンドウ金属材料としてアルミニウムとステンレス鋼、その他にガス圧力、ウィンドウ板厚及びウィンドウ形状を選んだ。

2.1 中性子透過率の定義

Fig.2.1 に中性子入射ウィンドウにおける中性子の透過過程を模式図で示した。2次元位置中性子検出器では、入射中性子のうち吸収または散乱をされず、その進行方向を変えられることなく、チェンバ内に入射して検出された中性子のみが有効データとなる。このことから、本稿の計算評価においては、散乱され後チェンバ内に入射して検出された中性子も減衰として扱い、計測に有効な中性子束を透過率（パーセント）で表し、式 2.1 により計算した。

$$P_n = \frac{\Phi_1(\Phi_0, \Sigma_n, t)}{\Phi_0} \times 100 [\%] \text{----- (2.1)}$$

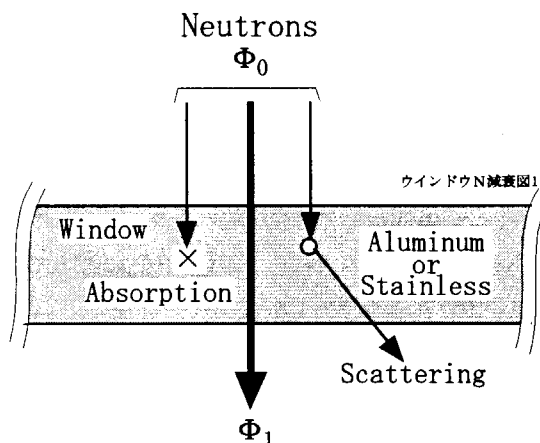


Fig.2.1 Schematic diagram of the neutron attenuation by the neutron-window of a MSGC pressure vessel.

ここで、 Φ_0 が入射中性子数、 $\Phi_1 = \Phi_0 \text{Exp}(-\Sigma_n t)$ が散乱をされずにウィンドウを透過した中性子数である。 Σ_n がウィンドウ材料の吸収

と散乱の合計断面積であり、 t はウィンドウの厚さである。ここでの中性子透過率の計算では、吸収、散乱及びトータル断面積は1eV以下の低エネルギー中性子に対する値を用いた。

ウィンドウにおける中性子吸収及び散乱を極力少なくするためには、ウィンドウ金属材料を選択すると共に板厚を可能な限り薄くすることが重要である。このため、本節ではウィンドウ材料としてアルミニウムとステンレス鋼の2種類について計算比較した。

2.2 アルミニウムの中性子透過率

MSGC圧力容器の中性子入射ウィンドウには、中性子の吸収及び散乱ができる限り小さくなるような設計が要求される。それで中性子入射ウィンドウ材料として吸収及び散乱断面積が小さいアルミニウムを用いた場合の中性子透過率を計算した。アルミニウム材としては、JIS規格⁽⁶⁾値から温度0~40°Cの範囲における許容引張応力が8.0 kgf/mm²で比較的大きいA5083P H32を

Table 2.1 Components of the aluminum such as A5083P H32 approved by the JIS.

Components	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Content (%)	<0.40	<0.40	<0.10	0.40~0.10	4.0~4.9	0.05~0.25	<0.25	<0.15	balance

用いることにした。A5083P H32 の成分表を Table 2.1 に示す。

中性子エネルギーをパラメータにアルミニウム A5083P H32 の中性子透過率を計算した。計算では Table 2.1 に示した A5083P H32 構成原子の夫々が持つ中性子に対するトータル断面積を用い、中性子エネルギーは 0.1meV から 1eV の範囲とした。透過率の計算でトータル断面積を用いたのは、2次元中性子位置検出器においては、中性子入射ウィンドウによって散乱された中性子も減衰に含めて計算するためである。アルミニウムの板厚を 0~10mm の範囲で透過率の変化を計算した。

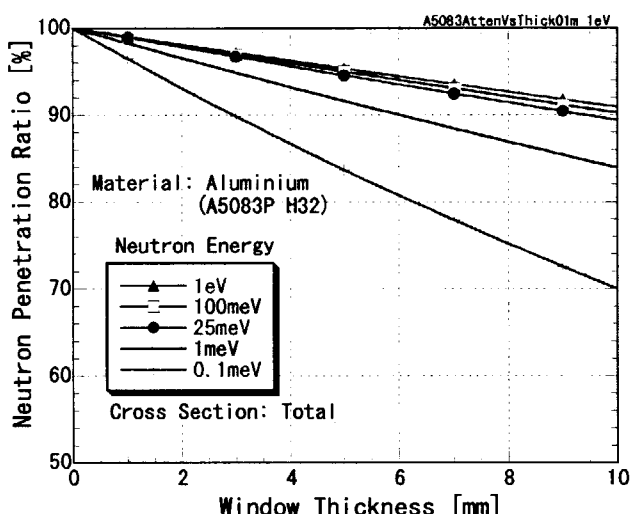


Fig.2.2 Neutron penetration ratios as a function of the thickness of the neutron-window made of the A5083P H32 aluminum.

計算結果を Fig.2.2 に示す。中性子の透過率は、中性子エネルギーが 25meV から 1eV の範囲では、大きな差がなく、アルミニウムの板厚が 10mm になってもほぼ 90% が透過することを示している。しかしながら、中性子エネルギーが 1meV になると中性子の透過率は少々低下し、板厚が 6mm で 90% になり、板厚が 10mm では 84% になる。中性子が 0.1meV の低エネルギー領域になると、中性子透過率は大幅に低下して、板厚が 3mm で 90%、6mm で 81%、10mm になると 70% 程度まで低下することを示している。

2.3 ステンレス鋼の中性子透過率

ステンレス鋼は、アルミニウムと比較した場合、強度及び硬度が大きいことからウィンドウ板厚を薄くできる、溶接が比較的容易でヘリウムリークを十分低くできる、且つガス気密シール用金属製パッキンとの整合性が良いという特徴を有している。それで、ステンレス鋼製ウィンドウの中性子透過率を計算した。ステンレス鋼としては、JIS 規格⁽⁶⁾ 値から温度 0~40°C の範囲における許容引張応力が 13.1 kgf/mm² で比較的大きい SUS316 を選択した。Table 2.2 に SUS316 の成分表を示す。

Table 2.2 Components of the stainless steel such as SUS316 approved by the JIS.

Components	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
Content (%)	<0.08	<1.00	<2.00	<0.045	<0.030	10~14	16~18	2~3	balance

SUS316 板における中性子透過率は、上記の成分表の構成原子が夫々持っている各中性子エネルギーに対するトータル断面積を用いて計算した。計算を行った中性子エネルギーは 0.1meV、1meV、25meV、100meV 及び 1eV である。板厚は 0~10mm の範囲とした。

Fig.2.3 に、ステンレス鋼製ウィンドウの板厚に対する中性子透過率の計算結果を中性子エネルギー別に比較して示した。ステンレス鋼の中性子透過率は、板厚だけでアルミニウムと比較する

と極めて低いことがわかる。中性子エネルギーが 25meV から 1eV の範囲では、透過率に大きな差がないが、このエネルギー範囲においても、板厚が 3 mm 以下でないと、透過率がおおよそ 75%以下になって、中性子入射ウィンドウとしては実用的でないことがわかる。中性子エネルギーが 1meV になると中性子の透過率は大幅に低下し、板厚が 1mm で 81%になり、板厚が 2mm では 65.7%になる。中性子が 0.1meV の低エネルギー領域になると、中性子透過率は著しく低下して、板厚が 0.5mm で 78.5%になり、1mm になると 61.7%まで低下することを示している。以上の計算結果から、中性子エネルギー 0.1meV 以上の中性子入射ウィンドウで、ウィンドウをステンレス鋼で製作する場合には、板厚を 1 mm 以下にしないと、中性子透過率が大幅に低下して実用上問題があることがわかった。

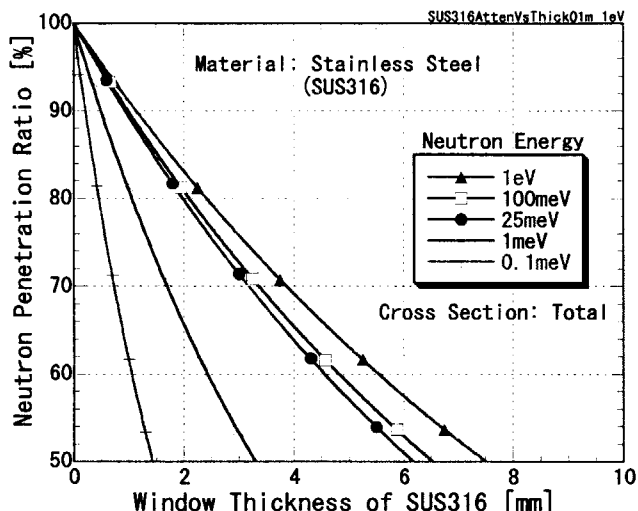


Fig.2.3 Neutron penetration ratios as a function of the thickness of the neutron-window made of the SUS316 stainless steel.

2.4 アルミニウムとステンレス鋼の中性子透過率の比較

アルミニウムとステンレス鋼の中性子透過率を比較するため、熱中性子（中性子エネルギー 25meV）における吸収、散乱及びトータル断面積から夫々の透過率を計算した。アルミニウム A5083P H32 あるいはステンレス鋼 SUS316 の構成成分は夫々Table2.1 及び 2.2 に示した値を使用した。

計算結果を Fig.2.4 に示す。グラフでは、同一面積の中性子入射ウィンドウを A5083P H32 あるいは SUS316 で製作した場合の中性子透過率の大きさを直接比較できるように、SUS316 の板厚を A5083P H32 と同等の強度が得られる厚さに換算して示した。A5083P H32 と SUS316 の許容引張応力は、J I S 規格⁽⁶⁾ 値から温度 0~40°C の範囲における夫々 8.0 および 13.1kgf/mm² を使用した。必要な強度の板厚は許容引張応力 σ_a の $1/\sqrt{\sigma_a}$ に比例する。従って、グラフ上では SUS316 の板厚は A5083P H32 板厚におよそ 0.78 倍した値となる。グラフの計算結果からわかるように、アルミニウム及びステンレス鋼とも吸収による中性子の減衰は少なく、減衰の殆どが散乱によるものである。

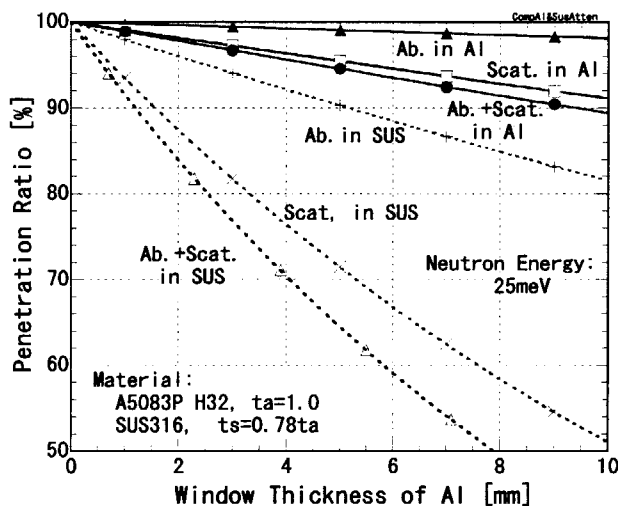


Fig.2.4 Thermal-neutron penetration ratios as a function of thickness of the neutron-window made of the aluminum or the stainless steel.

ウィンドウ材料としてアルミニウム A5083P H32 を用いた場合、ウィンドウ面積が 100x100mm、封入ガス圧力を 6 気圧にした時、強度の面からウィンドウ板厚は 5mm である⁽¹⁾。Fig.2.4 の計算結果では、板厚を 5mm にすれば、熱中性子のトータル透過率を 94.5%以上にできることを示している。上記と同じ条件でウィンドウを SUS316 で製作した場合、ウィンドウ板厚は 3.9mm である。Fig.2.4 のグラフでは横軸の 5mm が SUS316 の板厚 3.9mm に相当する。この時の SUS316 のトータル熱中性子透過率は 64.5%である。このように SUS316 でウィンドウを製作すると A5083P H32 の場合に比べて、熱中性子透過率は大幅に低下することを示している。

上記のことから、平板ウィンドウ型では、その材料にアルミニウム A5083P H32 を使用する方が良いことがわかった。

3. ウィンドウ形状の違いによる中性子透過率の比較

中性子入射ウィンドウにおける吸収及び散乱による減衰を少なくするには、金属材料の選択とウィンドウ板厚を薄くすることである。金属材料の選択については前章で述べた。必要なウィンドウ面積が決まっている場合には、耐圧強度が求められる平板状のウィンドウでは、封入ガス圧力によりウィンドウ板厚は決まってしまう。従って、板厚を薄くするには耐圧ウィンドウの形状を工夫する必要がある。本章では平板ウィンドウ型圧力容器と圧力バウンダリーを形成するための全半球形または皿形キャップを採用した圧力容器について、それらの熱中性子透過率を計算し、比較及び評価した。

3.1 熱中性子透過率の比較条件

本章における計算では、検出器ウィンドウの熱中性子透過率がMSGCチェンバのガス圧を上げた時にどのように変化するか調べた。封入ガス圧を上げると、圧力バウンダリーを形成するウィンドウの板厚は厚くなり、それに伴って中性子の透過率も低下するからである。平板ウィンドウ型ではウィンドウが、唯一、中性子を減衰させる構造物であるから、ウィンドウの熱中性子透過率のみを計算した。全半球形または皿形キャップ付圧力容器では、中性子を減衰させる要素は圧力バウンダリーのキャップ、圧力バランスのためのヘリウム4ガス層とMSGCチェンバ境界面に設ける薄平板形ウィンドウで構成されている。このように、二重構造の壁で設計されるMSGCでは、中性子がMSGCチェンバに到達するまでの総合の透過率を計算して、比較することとした。

3.2 平板ウィンドウ型圧力容器

3.2.1 熱中性子透過率の計算条件

Fig.3.1 に平板ウィンドウ型で設計したMSGCチェンバの断面図を示す。平板ウィンドウ板厚の計算では、その面積を100x100mmとして、封入ガス圧力に安全余裕を持って耐え得る板厚とした⁽¹⁾。計算式はJIS規格⁽⁶⁾の式3.1を用いた。

$$t = k \sqrt{\frac{P}{\sigma_a}} \text{-----(3.1)}$$

ここで、 t が板厚、 P が封入ガス圧力、 σ_a がウィンドウ材料の許容引張応力であり、 k はウィンドウの形状及びサイズで決まる係数である。

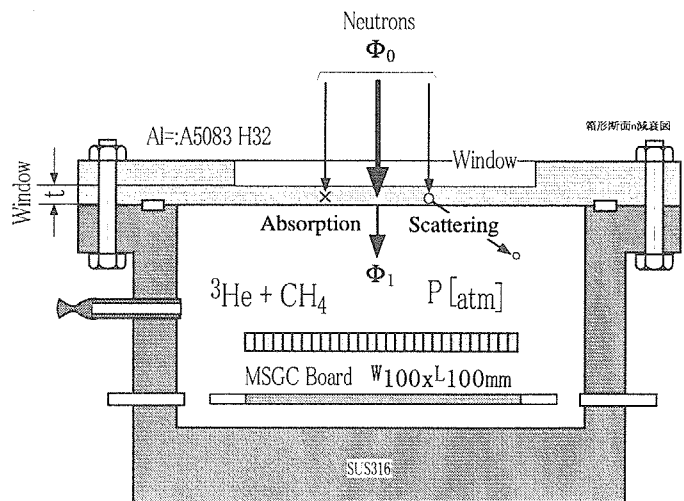


Fig.3.1 Schematic cross section of the MSGC with a flat-board-window for calculation of the neutron-penetration-ratio.

計測される有効な中性子は、ウィンドウで吸収または散乱を受けずにウィンドウを透過し、M S G C チェンバ内に到達して位置検出されたもののみである。従って、平板ウィンドウを採用した場合の中性子透過率は、式 2.1 の t に式 3.1 から求めた板厚を代入して計算することができる。

3.2.2 熱中性子透過率の計算結果

Fig.3.2 に封入ガス圧力に対するウィンドウ板厚と中性子透過率をグラフにして示す。ウィンドウ材質はアルミニウム A5083P H32 である。ウィンドウが平板状である結果、板厚は比較的厚くなり、例えば、封入ガス圧が 6 気圧の場合には 5mm、8 気圧で 5.8mm、10 気圧では 6.5mm 必要となる。吸収による透過率は 10 気圧でも 98%以上であり十分大きい。トータルの透過率は、その低下の殆どが散乱によるものであるが、封入ガス圧が 6 気圧の場合には 95%、8 気圧で 94%、10 気圧では 93.3%となった。

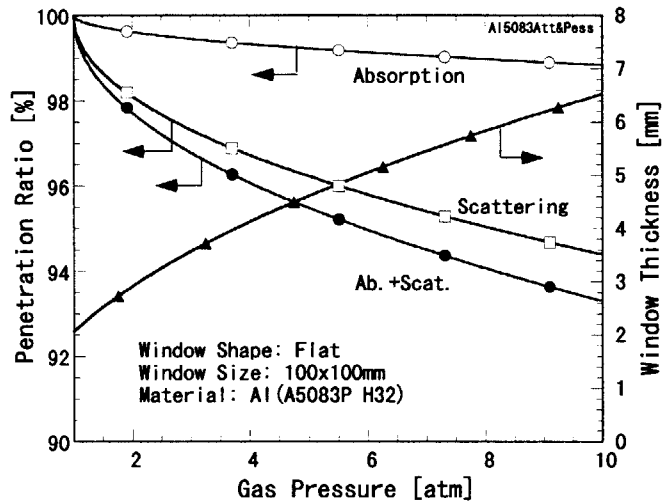


Fig.3.2 Penetration ratios of thermal-neutrons through the aluminum-flat-board-window and the required thickness according to Eq.(3.1) as a function of inner gas pressure.

Fig.3.3 ではウィンドウをアルミニウム A5083P H32 またはステンレス鋼 SUS316 を用いて製作した場合のウィンドウ板厚と熱中性子のウィンドウ透過率を比較したものである。封入ガス圧力が 6 気圧の条件では、A5083P H32 製ウィンドウの板厚は約 5 mm であり、SUS316 製では 4 mm である。同圧における熱中性子の透過率は、A5083P H32 製では 95% であり、SUS316 製では 66.7% であった。また、ガス圧力を 8 気圧にした場合には、A5083P H32 製と SUS316 製での板厚は、夫々 5.8mm 及び 4.6mm であり、10 気圧では 6.5mm と 5mm となった。8 気圧での熱中性子透過率は、

A5083P H32 製では 94%、SUS316 製では 62% であり、10 気圧にすると夫々 93% と 58% となった。

上記の計算結果から、ウィンドウ板厚では A5083P H32 製と SUS316 製の間での差は少しであるが、熱中性子の透過率では SUS316 製の方が大幅に低く、圧力を高くするに従ってその差が著しくなることがわかった。

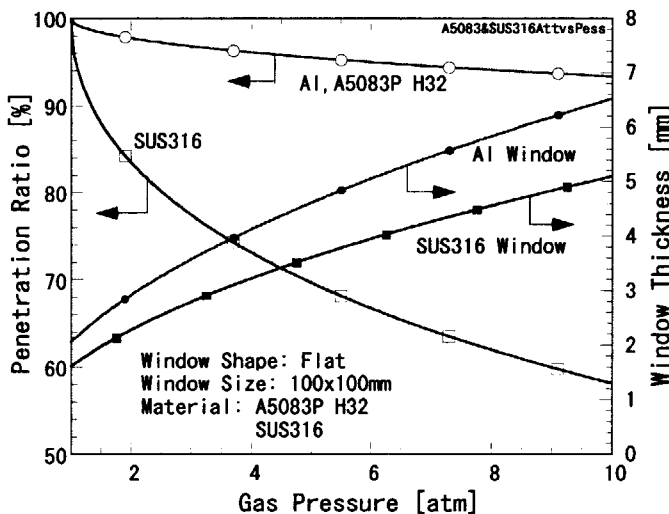


Fig.3.3 Penetration ratios of thermal-neutrons through the aluminum-flat-board-window and the required thickness according to Eq.(3.1) in comparison with those of stainless-steel-flat-window.

3.3 全半球形キャップ付圧力容器

3.3.1 熱中性子透過率の計算条件

Fig. 3.4 に全半球形キャップ付薄板ウィンドウを採用したMSGC圧力容器の断面構造図を示す。この圧力容器は、平板状薄板ウィンドウ、即ちインナーウィンドウの上に圧力バウンダリーを形成する全半球形キャップを設け、インナーウィンドウを境界としてMAGCチェンバ内にはヘリウム-3 混合ガスを加圧封入し、キャップ空隙にはヘリウム4 ガスを同圧で加圧していることを特徴としている。このような構造を採用することによって、インナーウィンドウには実質上圧力がかからないこと、及び圧力バウンダリーを形成するキャップが全半球形で応力集中が生じないことことから、両ウィンドウの板厚を薄くすることが可能になる。

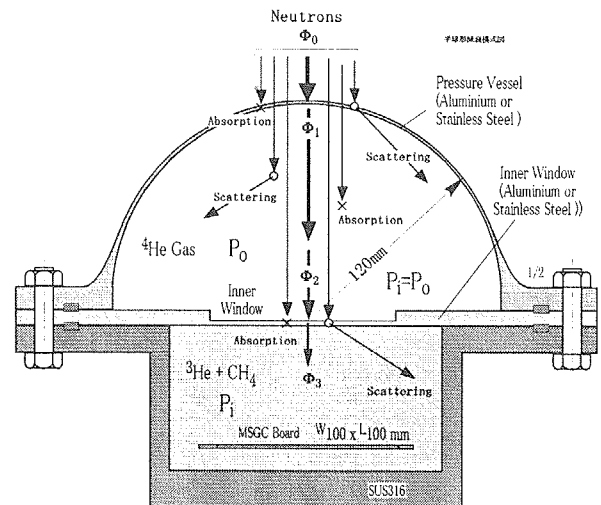


Fig.3.4 Schematic cross section of the MSGC with a half-ball-shaped cap and a thin flat-board window for calculation of the neutron penetration ratios.

全半球形キャップ付圧力容器では、ヘリウム4 ガス層を新たに設けたので、ガス圧によってどの程度、熱中性子透過率が減少するか、式 3.2 を用いて計算した。

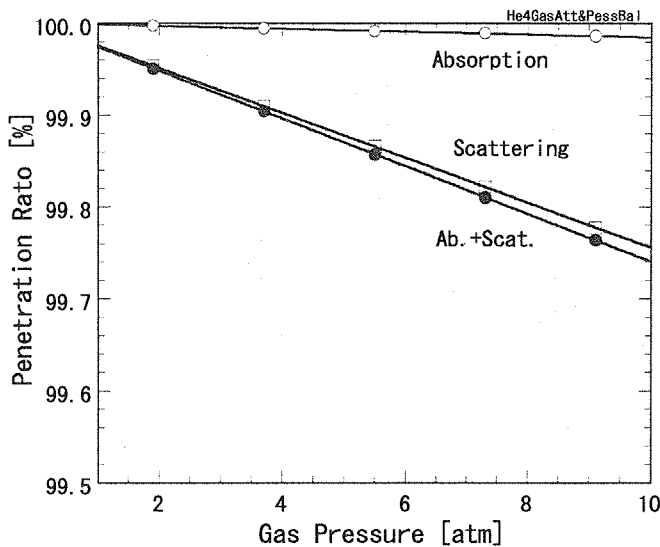


Fig.3.5 Penetration ratios of thermal-neutrons through the He-4 gas layer in the half-ball-cap.

$$P_n = \frac{\Phi_2(\Phi_1, \Sigma_n, t)}{\Phi_1} \times 100 \text{ [\%]} \text{--- (3.2)}$$

計算では、ヘリウム4 ガス層の厚さを最大値の 120mm に固定した。計算結果を Fig.3.5 に示す。

計算結果は、吸収による熱中性子の透過率がガス圧力 10 気圧においても 99.98%以上で極めて少なく、減衰の殆どが散乱によるものであることを示している。ガス圧力を 6、8 及び 10 気圧にした場合の吸収と散乱によるトータル透過率でも、夫々 99.84、99.79 及び 99.74% であった。このことから、新たに設けたヘリウム4 ガス層による中性子の減衰は、極めて小さいことがわかった。

3.3.2 アルミニウムを採用した場合の熱中性子透過率

全半球形キャップ付圧力容器における熱中性子の透過率については、全半球形キャップ、ヘリウム4 ガス充填層及びインナーウィンドウの 3 つの構造物によるトータルの減衰を考慮し、式 3.3

により計算した。ただし、計算では、吸収及び散乱によって生じる透過率を別々に計算すると共に、合計の透過率も計算した。

$$P_n = \frac{\Phi_3(\Phi_0, \Sigma_n, t)}{\Phi_0} \times 100 [\%] \dots (3.3)$$

ガス圧力を上げるに従って、全半球形キャップの板厚は増加するが、ヘリウム4ガス充填層及びインナーウィンドウの厚さについては、夫々120mmと1.0mmに固定して計算した。

Fig.3.6 に計算結果を示す。これは全半球形キャップ及びインナーウィンドウともアルミニウム A5083P H32 で製作した場合の計算結果である。Total Thickness はインナーウィンドウと全半球形キャップの板厚の合計値である。ガス圧を 10 気圧にした場合でも、全半球形キャップの板厚は 1.6mm で十分な強度を与える。吸収による熱中性子の透過率は、10 気圧においても 99.68%以上で十分高いことを示している。吸収と散乱によるトータルの熱中性子透過率は、その低下の殆どが散乱によるものであるが、ガス圧が 6、8 及び 10 気圧では夫々 98.4、98.2 及び 98%である。一方、ガス圧が 1 気圧の時、透過率は 98.9%となっている。これはインナーウィンドウを圧力に関係なく 1.0mm に固定したためである。

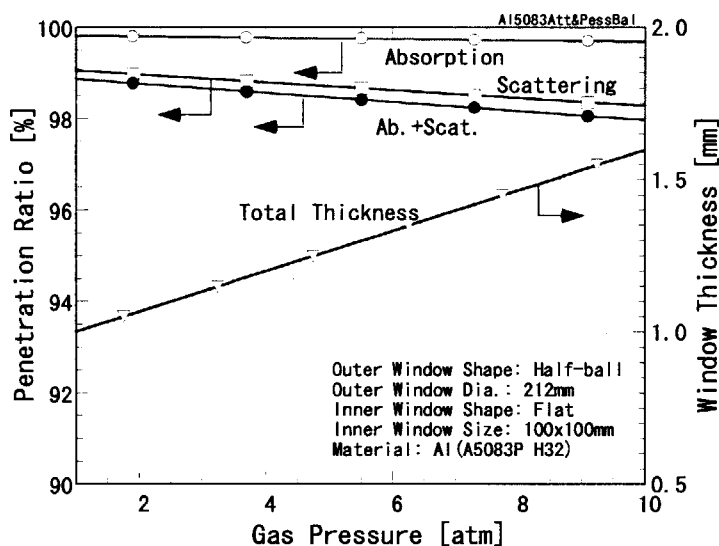


Fig.3.6 Penetration ratios of thermal neutrons through the aluminum-half-ball-shaped cap, He-4 gas layer, and the thin aluminum flat-board window.

3.3.3 ステンレス鋼を採用した場合の熱中性子透過率

全半球形キャップとインナーウィンドウの両方を SUS316 で製作した場合の板厚と熱中性子透過率の計算結果を Fig.3.7 に示す。インナーウィンドウの厚さは、アルミニウムの場合と同等の強度が得られるように 0.75mm に固定した。グラフではキャップとウィンドウの合計板厚を示している。従って、ガス圧が 10 気圧でも、SUS316 製キャップの厚さは 0.36mm あれば、十分な強度が得られることを示している。しかしながら、吸収と散乱によるトータルの透過率は、ガス圧を 6、8 及び 10 気圧に選択した時には夫々 89.7、88.9 及び 88%である。このように SUS316

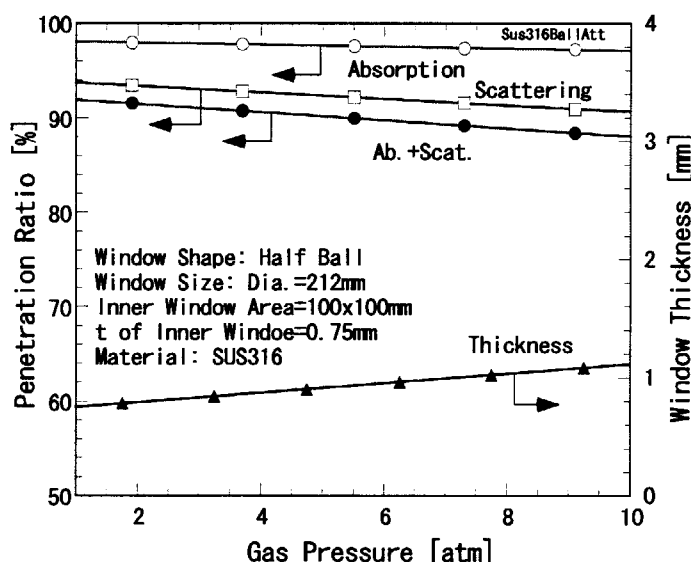


Fig.3.7 Penetration ratios of thermal neutrons through the SUS316-half-ball-shaped cap, He-4 gas layer, and the thin SUS316 flat-board window.

を用いた場合、キャップとインナーウィンドウの合計板厚は 1.1mm 程度で薄くできるが、熱中性子の透過率が 90%以下となって小さくなることがわかる。

3.4 皿形キャップ付圧力容器

3.4.1 熱中性子透過率の計算条件

Fig. 3.8 に皿形キャップとインナーウィンドウを採用したMSGC圧力容器の断面構造図を示す。図から明らかなように、この圧力容器の構造は、先に示した全半球形キャップを扁平にして皿形にした以外、全半球形キャップ付圧力容器と全く同じである。皿形キャップの内曲面の大半径は 212mm、隅の丸み半径を 27.5mm、ヘリウム-4 ガス層の最大厚さを 70mm にして計算した。皿形キャップの板厚は J I S 規格 JIS B 8243 に従って計算した。⁽¹⁾ アルミニウム A5083P H32 製インナーウィンドウの板厚は 1.0mm とした。たま、中性子の透過率については、式 3.3 を用いて計算した。

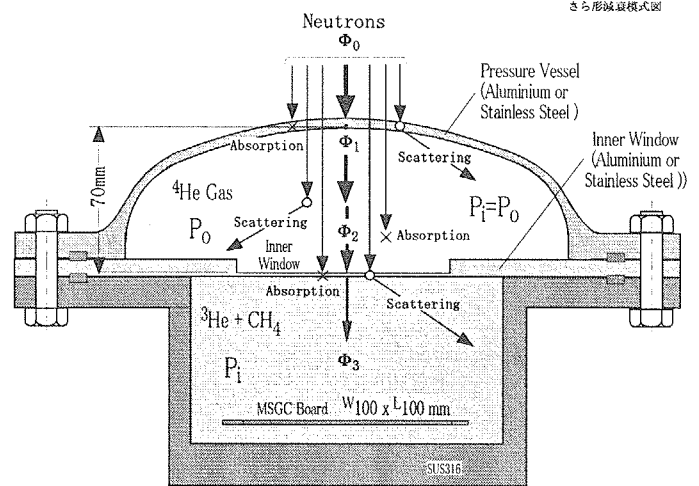


Fig.3.8 Schematic cross section of the MSGC with a dish-shaped cap and a thin flat-board window for calculation of the neutron-penetration-ratios.

3.4.2 熱中性子透過率の計算結果

Fig. 3.9 に、皿形キャップとインナーウィンドウの両方をアルミニウム A5083P H32 で製作した場合の板厚と中性子透過率の関係を示す。図から皿形キャップの板厚は、ガス圧が 6、8 および 10 気圧の場合に、夫々 0.47、0.66 及び 0.85mm あれば十分耐圧強度が得られることを示している。皿形キャップ付圧力容器の場合も、吸収のみを考慮した熱中性子の透過率は、99.64%以上で十分大きい。散乱を含めたトータルの透過率では、ガス圧が 6、8 および 10 気圧の場合に、夫々 98.3、98 及び 97.8%であった。

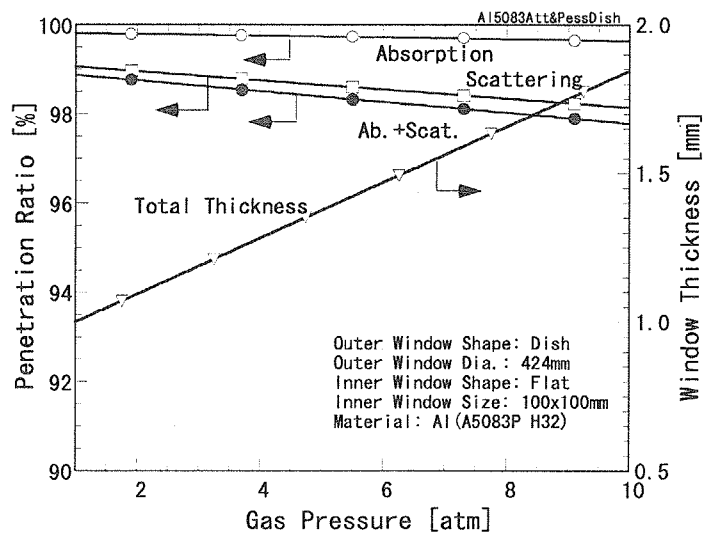


Fig.3.9 Penetration ratios of thermal-neutrons through the aluminum-dish-shaped cap, He-4 gas layer, and the thin aluminum-flat-board window.

皿形キャップとインナーウィンドウの両方を SUS316 で製作した場合の板厚及び熱中性子透過率を計算したが、全半球形キャップ付圧力容器の場合と同様の傾向を示し、熱中性子透過率はアルミニウムの場合よりかなり小さくなることがわかった。

3.5 各圧力容器における熱中性子透過率の比較

これまで検討してきた平板ウィンドウ型圧力容器、全半球形キャップ付圧力容器及び皿形キャップ付圧力容器の夫々に必要なウィンドウ板厚と各容器における熱中性子透過率を比較し、Fig.3.10 に示した。キャップ及びウィンドウの材料はアルミニウム A5083P H32 とした。熱中性子透過率に影響を与えるトータルの板厚の比較では、全半球形キャップ付と皿形キャップ付圧力容器との差は僅かであり、両者の板厚は 10 気圧でも 2mm 以下である。これらに対して、平板ウィンドウ型圧力容器では、ウィンドウ板厚は封入ガス圧と共に急

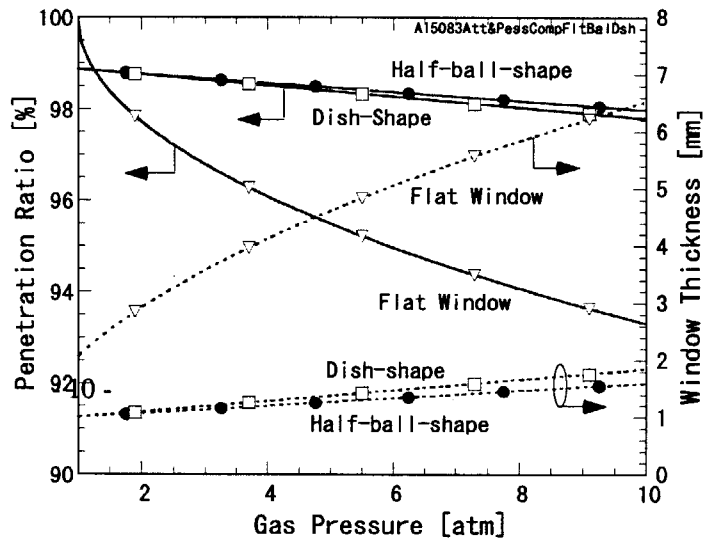


Fig.3.10 The neutron-window-thicknesses and thermal-neutron penetration ratios of the three kinds of pressure vessels for the MSGC.

激に増加し、10 気圧では 6.5mm 以上必要になることを示している。上記のことから、圧力バウンダリーを形成する全半球形あるいは皿形キャップを設けることにより、アルミニウム板厚を大幅に低減できることがわかった。

熱中性子透過率の比較でも、当然のことながら全半球形キャップ付と皿形キャップ付圧力容器との差は極めて少なく、ガス圧を 10 気圧にしても熱中性子透過率は 97.7% 以上である。一方、平板ウィンドウ型圧力容器ではガス圧を上げると共に、熱中性子透過率は減少し、10 気圧にすると 93.3% 以下になることがわかった。

4. 中性子の検出効率

4.1 検出効率を低下させる要素

中性子の検出効率を上げるには、中性子有感物質であるヘリウム-3 ガスの圧力を高くする方がよい。しかし、ガス圧を高くすると、圧力バウンダリーを形成する中性子入射ウィンドウの壁を厚くする必要があり、この結果ウィンドウでの中性子減衰が増大して、検出効率を低下させる。検出効率を上げるもう一つの方法は、ガス圧を上げずにチェンバの電極間ギャップ (Fig.4.1, 4.4, 4.7 の d_E) を大きくして、中性子とヘリウム-3 との反応確率を上げることである。しかしながら、電極間ギャップ d_E を大きくすると、中性子とヘリウム-3 原子とが反応する位置のバラツキ幅が大きくなってしまふ。この結果、パルス中性子源を用いた実験で重要な T O F (Time Of Flight) 計測での時間誤差が大きくなって中性子エネルギー分解能を低下させる。さらに、高計数率計測の性能を低下させる。

上記のことから、ヘリウム-3 ガス圧、中性子入射ウィンドウの板厚及びチェンバ電極間ギャップ d_E が互いに合い反する形で、中性子の検出効率を決定する要素となっていることがわかる。最適なMSGC圧力容器を設計するため、3種類の形状の圧力容器について中性子検出効率を計算し比較した。

4.2 平板ウィンドウ型圧力容器

4.2.1 検出効率のガス圧力依存性

Fig.4.1 に示すような平板ウィンドウ型圧力容器における検出効率の計算では、平板ウィンドウで吸収及び散乱される中性子の両方を減衰として扱い、更に、チェンバ電極間でヘリウム-3 ガスと反応することなく外部へ洩れた中性子も損失として扱った。ヘリウム-3 混合ガス中での散乱は、比較的小さいと予想されるため、損失として考慮しなかった。検出効率の計算式を式 4.1 に示す。中性子検出効率は入射した総中性子数に対するヘリウム-3 原子と反応した中性子数の割合としてパーセントで表した。

$$\eta_n = \frac{\Phi_1 - \Phi_3}{\Phi_0} \times 100 = P_n - \frac{\Phi_3}{\Phi_0} \times 100 \text{ [%]} \text{----- (4.1)}$$

熱中性子に対する検出効率の計算結果を Fig.4.2 に示す。計算では、チェンバ電極間ギャップ d_E をパラメータにして、ヘリウム-3 混合ガスの圧力を変え、そのガス圧に必要なウィンドウ厚さを

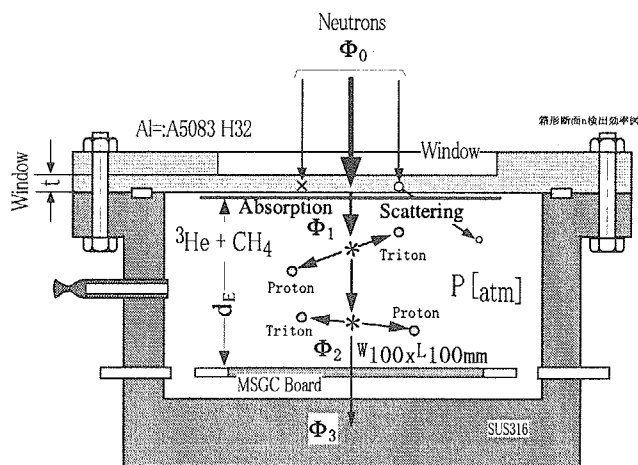


Fig.4.1 Schematic cross section of the MSGC with a flat-board window for the calculation of neutron-detection-efficiency.

与えて、検出効率を求める方法で行った。平板ウィンドウの材質にはアルミニウム A5083P H32 を採用し、ウィンドウ面積は 100x100mm とした。電極間ギャップ d_E は 15~50mm の間に設定し計算した。ヘリウム-3 混合ガスの成分比はヘリウム-3 ガスを 80%、メタンガスを 20%とし、封入ガス圧力が変わっても比率は同じにした。従って、ヘリウム-3 ガスの分圧はグラフで示される圧力の 0.8 倍である。中性子のエネルギーは熱中性子 25meV として計算した。

計算結果では、電極間ギャップ d_E を 15mm にした場合、熱中性子の検出効率はガス圧力が 6、8 及び 10 気圧の時に夫々 58.6、67.9、74.4% となって、低い値しか得られないことを示している。ガス圧力を 10 気圧に固定して比較すると、電極間ギャップ d_E が 20、30、40 及び 50mm では検出効率は夫々 82.2、89.5、92、92.8% である。このように平板ウィンドウ型圧力容器では、80% 以上の検出効率を得るには電極間ギャップ d_E が 20mm 以上必要であることがわかる。電極間ギャップ d_E を大きくしても、また、ガス圧を上げて、最大の検出効率は 93% 以上得られないことがわかる。

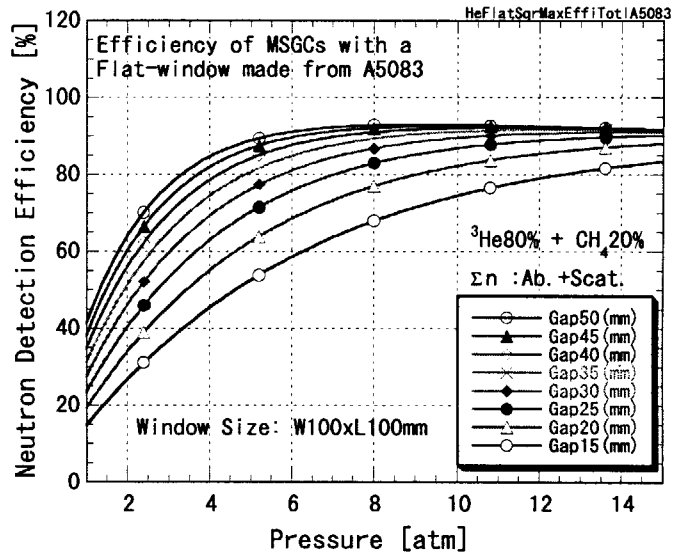


Fig.4.2 Thermal-neutron detection efficiencies of the MSGC with the flat-board window as a function of pressure of He-3 mixture gas.

4.2.2 検出効率の中性子エネルギー依存性

平板ウィンドウ型圧力容器における検出効率の中性子エネルギー依存性を調べるため、中性子エネルギーが 0.1meV~1eV の範囲で検出効率を計算した。ウィンドウ材料はアルミニウム A5083P H32 である。計算ではヘリウム-3 混合ガス条件をヘリウム-3 ガス 80%、メタンガス 20%とし、ガス圧力を 8 気圧とした。この条件でのウィンドウ厚さは 5.8mm である。電極間ギャップは 15~50mm の範囲で計算した。

計算結果を Fig.4.3 に示す。計算結果の中性子検出効率は、中性子エネルギーが 5meV 以下では、電極間ギャップ d_E の大きさには全く依存しないが、エネルギーが 5meV から低くなるに従って、緩やかに低下することを示している。また、エネルギーが 5meV 以上では、電極間ギャップ d_E が狭いほど低いエネルギーから、その上、大きな勾配で、検出効率は低下することがわかる。このように中性子エネルギー 5meV を境に検出効率が異なった特性を示すのは、次

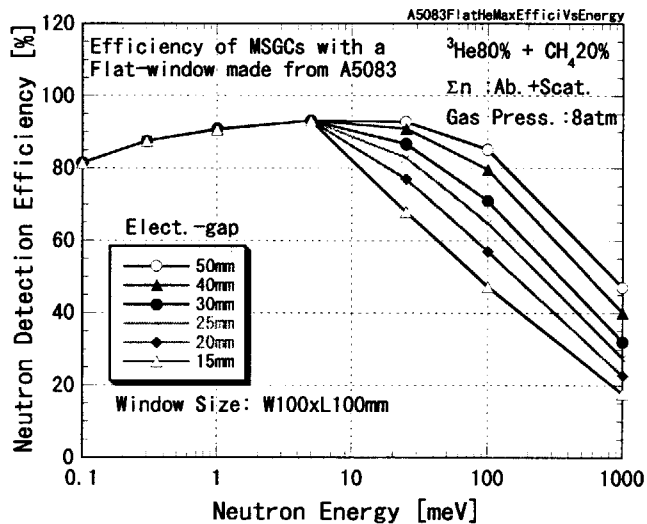


Fig.4.3 Neutron detection efficiencies of the MSGC with the flat-board window as a function of neutron energy.

のような理由による。

中性子エネルギーが 5meV 以下では、ヘリウム-3 の中性子反応断面積が約 $1.2 \times 10^4 [\text{barns}]$ 以上で極めて大きい結果、電極間ギャップ d_E が 15mm 及びヘリウム-3 ガス分圧が 6.4 気圧の条件で、電極間に入射した中性子はほぼ 100% 検出されるため、電極間ギャップ d_E の大きさが変わっても検出効率には変動がない。中性子エネルギー 5meV 以下で検出効率が緩やかに低下する原因は、エネルギーが低くなるにしたがって、アルミニウム構成原子の吸収及び散乱中性子断面積が大きくなって、ウィンドウによる中性子の減衰が増大するためである。

5meV 以上で検出効率が急激に低下するのは、ヘリウム-3 ガスの中性子反応断面積が小さくなって、中性子の洩れが増大するためである。電極間ギャップ d_E が狭いほどより低いエネルギーから、且つより大きな勾配で低下するのは、電極間ギャップ d_E が狭くなればなるほど洩れ中性子が多くなるためである。

中性子エネルギーが 0.1 、 1.0 及び 5meV における検出効率は、夫々 81 、 91 及び 93% である。電極間ギャップ d_E が 30mm の場合、中性子エネルギーが 25 、 100 及び 1000meV における検出効率は、夫々 87 、 71 及び 32% である。また、グラフから明らかなように、中性子エネルギーが 5meV 以下では 80% 以上の検出効率が得られるが、 5meV 以上では急激に検出効率が低下することがわかる。このように、平板ウィンドウ型のMSGCでは、検出効率が中性子エネルギーに大きく依存していることから、MSGCの設計製作及びそれを用いた実験計測において、このことを十分配慮する必要がある。

4.3 全半球形キャップ付圧力容器

4.3.1 中性子検出効率の計算条件

Fig.4.4 に示すような全半球形キャップ付圧力容器における中性子検出効率を計算した。この容器では、圧力バウンダリーを形成する全半球形キャップ、そのキャップ内に封入されるヘリウム-4 ガス及びインナーウィンドウで中性子の吸収及び散乱が生じる。このため、吸収と散乱の合計を入射中性子の減衰として扱った。全半球形キャップ内のヘリウム-4 ガス圧力は、MSGC チェンバ内のヘリウム-3 混合ガス圧力と同じになるように封入するものとした。このことから、封入ガス圧力に耐える強度が得られるように、全半球形キャップの板厚を変化させた。ヘリウム-4 ガス層の最大厚さは 120mm である。内部薄板ウィンドウの面積は $100 \times 100\text{mm}$ に固定した。板厚は材質がアルミニウム A5083P H32 の時は 1.0mm に、ステンレス鋼 SUS316 の時にはアルミニウムと同等の強度が確保できるように 0.75mm とし、固定した。

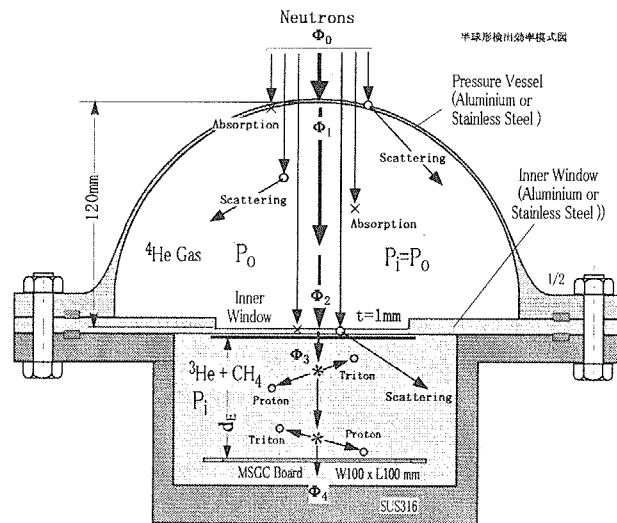


Fig.4.4 Schematic cross section of the MSGC with a half-ball-shaped cap and a thin flat-board window for the calculation of neutron-detection-efficiency.

中性子検出効率の計算式は、式 4.2 に示した。

$$\eta_n = P_n - \frac{\Phi_4}{\Phi_0} \times 100 \text{ [%]} \text{-----(4.2)}$$

ここで P_n は全半球形キャップ付圧力容器が持っている中性子透過率である。

4.3.2 検出効率のガス圧力依存性

Fig.4.5 に熱中性子検出効率の計算結果を示す。この計算結果は全半球形キャップ及びインナーウィンドウともアルミニウム A8053P H32 により製作した場合である。平板ウィンドウ型圧力容器と比較するために、電極間ギャップ d_E を 15mm にした場合について見ると、中性子の検出効率はガス圧力を 6、8 及び 10 気圧にした時に夫々 60.7、70.8、78.2% が得られる。平板ウィンドウ型圧力容器では同条件において夫々 58.6、67.9、74.4% であったから、全半球形キャップ構造を採用すると、中性子検出効率は 2~4% 程度改善されることを示している。ガス圧力を 10 気圧の場合で比較すると、電極間ギャップ d_E が 20、30、40 及び 50mm では検出効率は夫々 86.3、94、96.6、97.5% である。同条件の平板ウィンドウ型圧力容器では夫々 82.2、89.5、92、92.8% であったから、全半球形キャップ構造を採用すると、中性子検出効率は 4~5% 程度改善されることを示している。上記に示したように電極間ギャップ d_E が 20mm 以下の狭い条件の下で検出効率が 80% 台で低いのは、圧力容器壁及びインナーウィンドウ壁による減衰よりも、電極間のヘリウム-3 ガスと反応しないで検出器外へ洩れる中性子の割合が大きいことに起因している。

4.3.3 検出効率の中性子エネルギー依存性

全半球形キャップ付圧力容器における検出効率の中性子エネルギー依存性を計算した。ウィンドウ材質がアルミニウム A5083P H32、封入ガス圧力が 8 気圧、電極間ギャップ d_E が 15~50mm で、計算条件は平板ウィンドウ型圧力容器の場合と同じである。

計算結果を Fig.4.6 に示す。中性子エネルギーが 5meV 以下では電極間ギャップ d_E の大きさに関係しないことは、平板ウィンドウ型圧力容器の場合と同じである。しかし、全半球形キャップ付圧力容器では、検出効率は 5meV に対して 97.9%、0.1meV の低エネルギーに対しても 94.5% あり、ほぼフラットで極めて高い検出効率が得

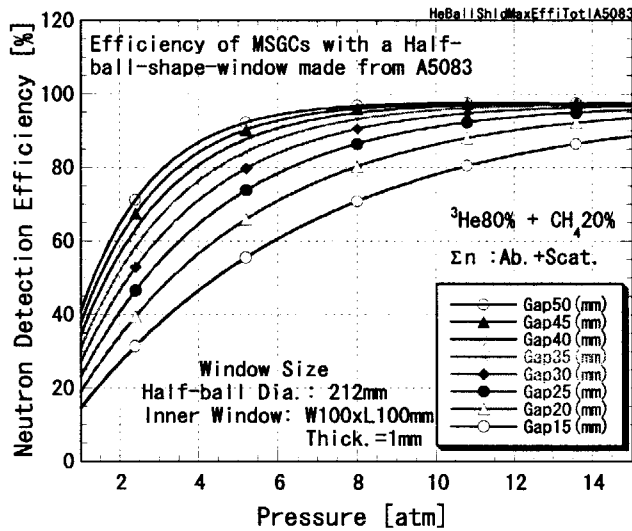


Fig.4.5 Thermal-neutron detection efficiencies of the MSGC with the half-ball-shaped cap as a function of pressure of He-3 mixture gas.

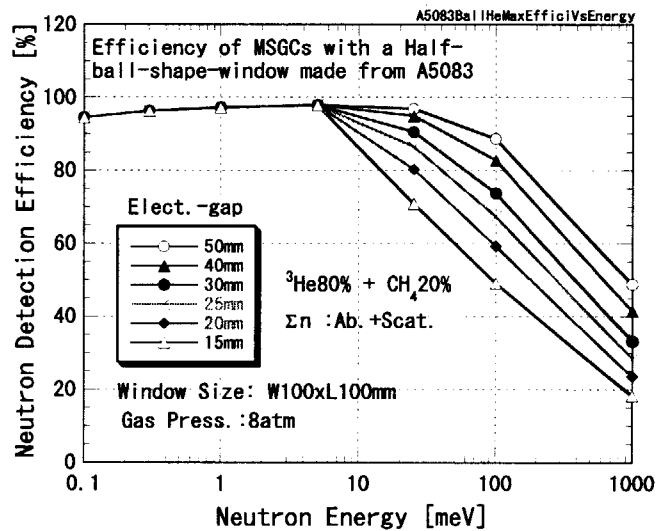


Fig.4.6 Neutron detection efficiencies of the MSGC with the half-ball-shaped cap as a function of neutron energy

られることである。

洩れ中性子による検出効率の低下が生じる中性子エネルギー領域においても、電極間ギャップ d_E を 40mm にすれば、熱中性子 25meV まではフラットな検出効率特性を得ることができる。

4.4 皿形キャップ付圧力容器

4.4.1 中性子検出効率の計算条件

Fig.4.7 に示すような皿形キャップ付圧力容器は、全半球形のキャップ部分を扁平にしたこと以外、全半球形キャップ付圧力容器と全く同じ構造である。圧力バウンダリーのキャップを皿形にすると、応力の偏りが生じるため、板厚は全半球形に比べて若干厚くなる。しかし、皿形キャップ付圧力容器は、圧力容器全体のボリュームを小さくできること、ヘリウム-4 ガス充填層の厚みを狭く且つ比較的平坦にできる優位性を持っている。皿形キャップの大半径は 212mm であり、隅の丸みの半径を 27.5mm とした。この結果、キャップに封入するヘリウム-4 ガス層の最大厚みは 70mm となった。計算式は式 4.2 と同じである。

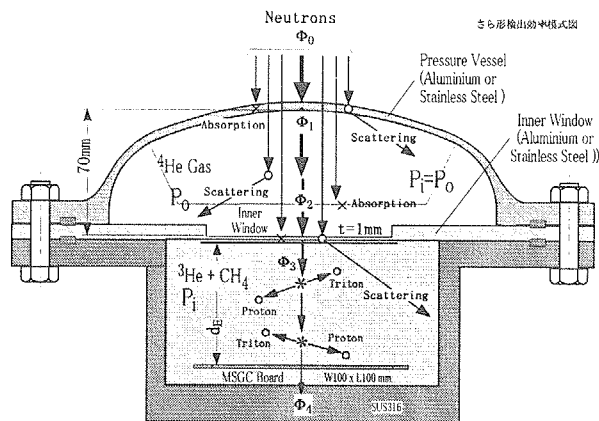


Fig.4.7 Schematic cross section of the MSGC with a dish-shaped cap and a thin flat-board window for the calculation of neutron detection efficiency.

4.4.2 検出効率のガス圧力依存性

Fig.4.8 に皿形キャップ付圧力容器における熱中性子検出効率の計算結果を示す。この計算結果もキャップ及びインナーウインドウともアルミニウム A8053P H32 により製作した時のものである。

電極間ギャップ d_E を 15mm にした場合について見ると、中性子の検出効率はガス圧力を 6、8 及び 10 気圧にした時に夫々 60.6、70.7、78% が得られる。全半球形キャップ付圧力容器では同条件において夫々 60.7、70.8、78.2% であったから、皿形と全半球形キャップ付圧力容器の中性子検出効率は殆ど変わらないことを示している。

ガス圧力を 10 気圧の場合で比較すると、電極間ギャップ d_E が 20、30、40 及び 50mm では検出効率は夫々 86.2、93.8、96.4、97.3% である。同条件の全半球形キャップ付圧力容器では夫々 86.3、94、96.6、97.5% であったから、こちらの比較でも差は極めて僅かであり、皿形と全半球形キャップ付圧力容器の中性子検出効率は殆ど変わらないことがわかる。

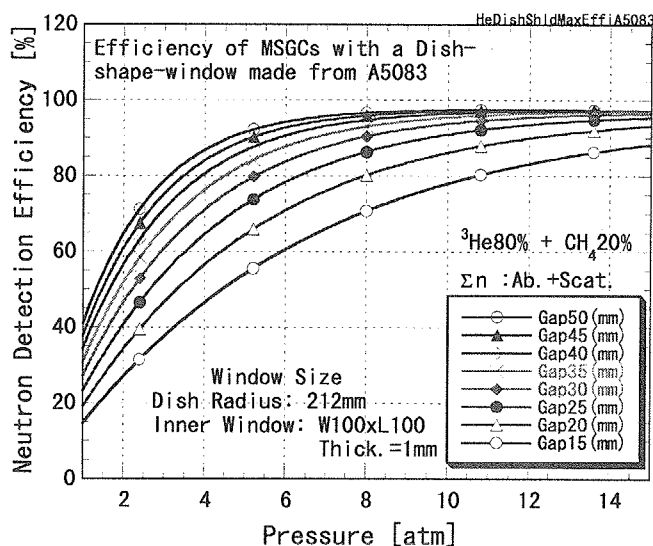


Fig.4.8 Thermal-neutron detection efficiencies of the MSGC with the dish-shaped cap as a function of pressure of He-3 mixture gas.

4.4.3 検出効率の中性子エネルギー依存性

皿形キャップ付圧力容器の検出効率は、電極間ギャップ d_E 及びヘリウム-3 混合ガス圧力を変えても、熱中性子 25meV に対しては全半球キャップ付圧力容器と殆ど変わらないことを前項で述べた。本項では検出効率の中性子エネルギー依存性について検討する。

Fig.4.9 に計算結果を示す。グラフが示すように、検出効率は中性子エネルギー5meV 以下では電極間ギャップ d_E の影響を殆ど受けないが、5meV 以上では影響を顕著に受ける。この理由については 4.2.2 項で既に述べた。電極間ギャップ d_E の影響がない最大エネルギーの 5meV における検出効率は、97.7%である。また 0.1meV では 93.8%である。このことから、中性子エネルギー5meV 以下では、検出効率は極めて高く、且つほぼフラットな特性が得られることがわかる。電極間ギャップ d_E が 40mm の場合で、熱中性子 25meV に対する検出効率は 94.8%である。従って、40mm 以上の電極間ギャップ d_E であれば、中性子エネルギーが 0.1~25meV の範囲においては、94%以上でほぼフラットな検出効率が得られることがわかった。

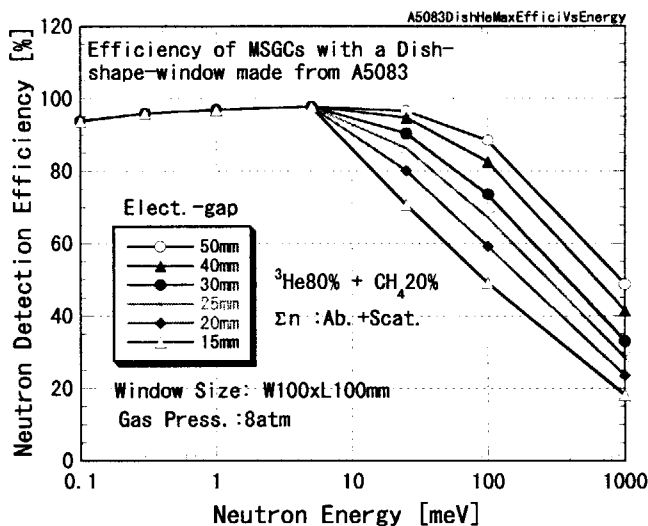


Fig.4.9 Neutron detection efficiencies of the MSGC with the dish-shaped cap as a function of neutron energy.

4.5 形状が異なる圧力容器の中性子検出効率の比較

4.5.1 電極間ギャップ 20mm の MSGC

これまで、平板ウィンドウ型、全半球形キャップ付及び皿形キャップ付の3種類の圧力容器における中性子検出効率の計算結果について議論してきた。3種類の圧力容器の優劣を評価するため、Fig.4.10 に夫々の中性子検出効率を比較して示した。これらは電極間ギャップ d_E を 20mm で計算した結果である。アルミニウムで製作された容器の比較では、全半球形キャップ付と皿形キャップ付圧力容器の検出効率の間に差が殆どなく、ガス圧力を 6、8 及び 10 気圧に選択した時には検出効率は 71、80、86%である。平板ウィンドウ型圧力容器では、同じ圧力条件の下での検出効率は 68.5、77 及び

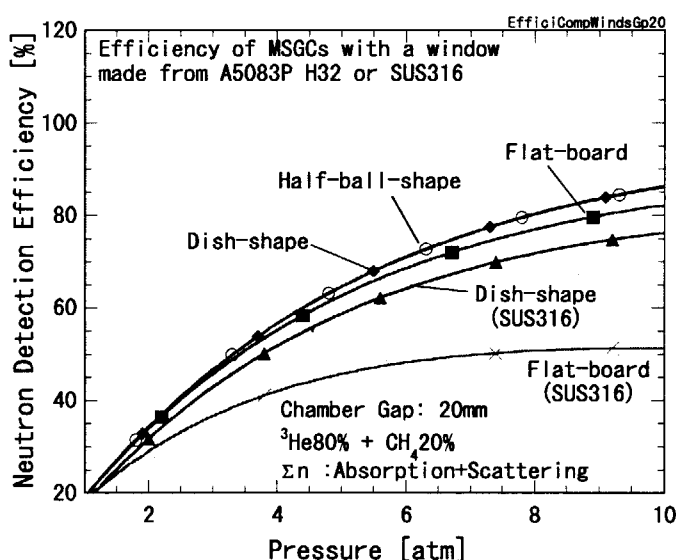


Fig.4.10 Neutron-detection-efficiencies of the MSGCs with the flat-board-window, the half-ball-shaped cap and the dish-shaped cap, in a case that the gap of electrodes is 20mm.

82.2%となって、僅かに低下することを示している。上記のように、3種類の圧力容器における夫々の検出効率の差異が僅かであるのは、検出効率の決定要素として、中性子入射ウィンドウ等による中性子の減衰よりも、電極間ギャップ d_E が 20mm で狭いことによる中性子の洩れの方が支配的であるからである。

Fig.4.10 にはウィンドウ材料の比較のため、皿形キャップとインナーウィンドウを組合せた圧力容器及び平板ウィンドウ型圧力容器を夫々ステンレス鋼 SUS316 で製作した場合の検出効率を合わせて示した。SUS316 製の皿形キャップ付圧力容器では、ガス圧力が 6、8 及び 10 気圧の時に、検出効率は 64.1、71.8、76.3%であり、アルミニウムの平板ウィンドウ型圧力容器よりも更に低くなることを示している。これに対して、SUS316 の平板ウィンドウ型圧力容器では、同じガス圧条件下で、検出効率は 48.2、50.7 及び 51.2%となって大幅に低下することがわかる。更に、ヘリウム-3 混合ガス圧力が 7 気圧以上では、平板ウィンドウによる中性子の減衰が増加して、検出効率は殆ど上昇しないこともわかる。

4.5.2 電極間ギャップ 40mm の MSGC

Fig.4.11 に電極間ギャップ d_E を 40mm にした場合の各圧力容器の検出効率を比較して示した。アルミニウムで製作された容器では、ガス圧力を 6、8 及び 10 気圧に選択した時の全半球形キャップ付と皿形キャップ付圧力容器の検出効率は、両者間に殆ど差がなく、91、95、96%である。平板ウィンドウ型圧力容器の検出効率は夫々 87.6、91 及び 92%となって、4%程度低下することを示している。一方、ステンレス鋼 SUS316 で製作した皿形キャップ付圧力容器では、ガス圧力が 6、8 及び 10 気圧の時に、検出効率は 82、84.8、85.3%であり、アルミニウムの平板ウィンドウ型圧力容器よりも少し低くなることを示している。

上記で述べた 4 種類の圧力容器の検出効率に共通していることは、ヘリウム-3 混合ガス圧力が 7 気圧以上では検出効率の向上は僅かであるということである。即ち、電極間ギャップ d_E が 40mm の MSGC では、ヘリウム-3 混合ガス圧力を 7 気圧程度に設計すると最も効果的且つ経済的であることを示している。このように本稿の計算結果より、電極間ギャップ d_E が決まれば、その構造に最も適したヘリウム-3 混合ガス圧力を設計値として与えることができる。

SUS316 で製作した平板ウィンドウ型圧力容器で、ガス圧力を 6、8 及び 10 気圧にした時の検出効率は 61.6、59.9 及び 57.3%となって、著しく低くなることを示している。この容器ではヘリウム-3 混合ガス圧力が 5.7 気圧の時に検出効率が最も高く 61.6%であり、これ以上の検出効率を得ることができない。

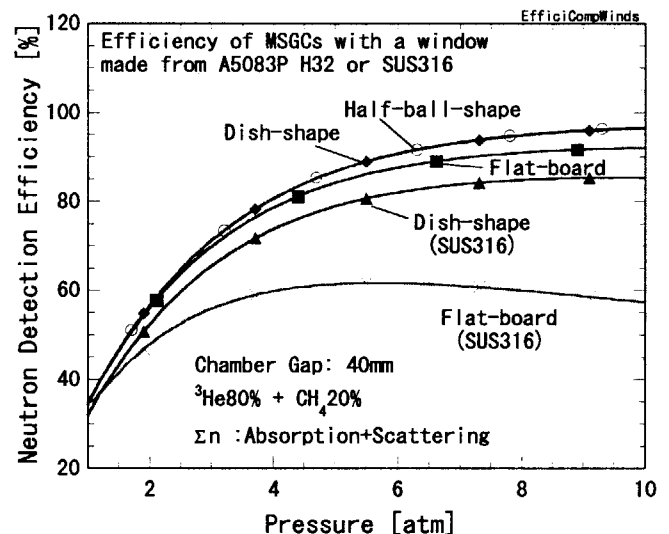


Fig.4.11 Neutron-detection-efficiencies of the MSGCs with the flat-board-window, the half-ball-shaped cap and the dish-shaped cap, in a case that the gap of electrodes is 40mm.

4.5.3 中性子エネルギー依存性の比較

これまで検討してきた平板ウィンドウ型圧力容器、全半球形キャップ付圧力容器及び皿形キャップ付圧力容器が有する検出効率の中性子エネルギー依存性を比較して、Fig.4.12 に示した。計算条件は、キャップ及びウィンドウ材料がアルミニウム A5083P H32 で、電極間ギャップ d_E が 30mm、ヘリウム-3 混合ガスが 80%ヘリウム-3 と 20%メタンガスの混合ガスで、圧力を 10 気圧とした。

平板ウィンドウ型圧力容器では、ガス圧を 10 気圧にするとウィンドウ壁が厚くなってしまいう結果、ウィンドウによる中性子の減衰が少々おおきくなるため、5meV においても、検出効率は 92%程度になってしまう。そして、中性子エネルギーが低くなるにしたがって検出効率は低下して、0.1meV では 80%以下になってしまうことを示している。

一方、グラフから明らかなように、全半球形キャップ付圧力容器と皿形キャップ付圧力容器における中性子検出効率のエネルギー依存性曲線は、殆ど変わらないといえる。このことから、全半球形キャップ付圧力容器よりも皿形キャップ付圧力容器の方が、容器全体のボリュームをより小さく製作できることから、優れているといえる。

皿形キャップ付圧力容器では、中性子エネルギーが 0.1~25meV の範囲においては 93%~97% の検出効率を得られることから、この容器を採用することにより極めて高くフラットな検出効率を得られることがわかった。

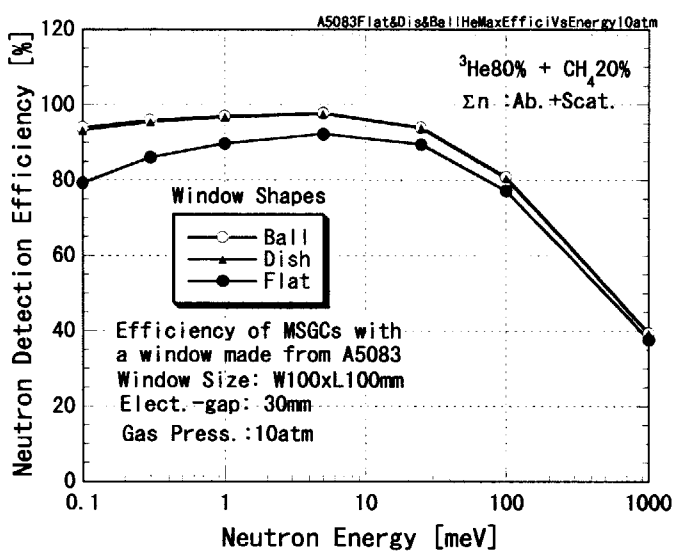


Fig.4.12 Neutron detection efficiencies of the MSGC with the flat-board-window, the half-shaped cap, and the dish-shaped cap as a function of the neutron energy.

5. 結 論

中性子 2 次元検出用 MSGC を開発するため、MSGC 電極基板を収納し、ヘリウム-3 混合ガスを高圧で封入する圧力容器がその材質及び構造の違いによって、中性子検出効率がどのような値になるか計算、評価した。また、検出効率の中性子エネルギー依存性についても調べた。中性子ウィンドウ材料としてはアルミニウム A5083P H32 及びステンレス鋼 SUS316 の 2 種類を用いて比較した。圧力容器構造の種類は、平板ウィンドウ型圧力容器、全半球形キャップ付圧力容器及び皿形キャップ付圧力容器の 3 種類である。

SUS316 を採用した中性子ウィンドウでは、SUS316 の許容引張応力が A5083P H32 のそれと比較して大きいことから、その板厚を薄くすることができること、また、硬度が比較的大きいことから耐圧容器には不可欠なメタルパッキンとの整合性に優れているなどの特徴を有する。しかし、中性子ウィンドウによる減衰を計算比較した結果、SUS316 製平板ウィンドウの熱中性子減衰は 30~42% であり A5083P H32 製のそれよりも 25~35% 大きく、ウィンドウ材料としては A5083P H32 が優れていることがわかった。しかしながら、全半球形キャップ付圧力容器を採用するとウィンドウ板厚を十分薄くできることから、SUS316 を用いても熱中性子の減衰を 12% 以下にすることが可能であることも示した。

圧力容器形状による中性子検出効率の検討では、全半球形キャップ付圧力容器と皿形キャップ付圧力容器の検出効率には殆ど差がなく、材質がアルミニウム A5083P H32、電極間ギャップが 30mm 及びヘリウム-3 ガスの分圧が 8 気圧の条件において、熱中性子に対して 93.8% の高い検出効率が得られることがわかった。平板ウィンドウ型圧力容器の検出効率は、上記と同条件の下で、89.5% であり、皿形キャップ付圧力容器のそれより若干低くなることがわかった。

検出効率の中性子エネルギー依存性については、全半球形キャップ付圧力容器と皿形キャップ付圧力容器との間に殆ど差がなく、上記と同じ条件では、中性子エネルギーが 0.1~25meV の範囲において 93% 以上の高い検出効率で、ほぼフラットな検出効率特性が得られることがわかった。

上記に示したように今回の検討の結果、中性子検出効率がより高い、中性子エネルギー依存性がより少ない及び検出器圧力容器ボリュームがより小さいとの総合判定から、アルミニウム A5083P H32 を用いた皿形キャップ付圧力容器が最も優れていることがわかった。また、本稿で示した MSGC の中性子検出効率の計算評価方法は、今後の MSGC の設計、製作に役立つことはもとより、MSGC を用いた中性子 2 次元分布計測データの解析にも有用であると考えられる。

謝 辞

MSGC用圧力容器の中性子検出効率の計算評価では、ガスカウンター用電離ガスを用いた場合の中性子感度計算方法等についてご教授頂いた日本原子力研究所・先端基礎研究センター・副主任研究員の坂佐井 馨氏、パルス中性子ビームを用いた中性子散乱実験におけるMSGCの検出効率評価方法をご教授頂いた中性子科学研究センター・副主任研究員の松林政仁氏に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

1. 山岸秀志、金子純一、“中性子2次元検出型マイクロストリップガスカウンタ圧力容器の設計”、JAERI-Tech 2000-079, October 2000
2. 越智敦彦、谷森 達、西 勇二、青木俊介、西 泰朗、“微細加工技術を用いた放射線検出器の開発”、放射線、ISSN 0285-6-3604, Vol.25, No.1 January 1999
3. A.Ochi, “Study of MicroStrip Gas Chamber as a Time-Resolved X-ray Area Detector”, Department of Physics Tokyo Institute of Technology, TIT-HPE-98-04, March 1998
4. Y.Nishi, T.Tanimori, A.Ochi, et al, “Development of a hybrid MSGC with a conductive capillary plate”, Part of SPIE Conference on Detector for Crystallography and Diffraction Studies at Synchrotron Sources, July 1999, SPIE Vol.3774
5. Fabio Sauli, “Micro-pattern Gas Detector”, 5th Conference on Position Sensitive Detectors, CERN-EP/99-147, October 1999
5. Anna Preisert, Fabio Sauli, “Drift and Diffusion of Electrons in Gases: a Compilation”, CERN 84-08, Experimental Physics Division, July 1984
6. “圧力容器の構造”、JIS B 8243-1981, 日本工業標準調査会 審議、日本規格協会

This is a blank page.

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	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	
光束	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	b
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 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 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 = 10⁶ 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

2次元検出型マイクロストリップガスカウンタの中性子検出効率の計算評価