

JAERI-Tech  
2000-079



JP0150190



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検討

2001年 1月

山岸 秀志・金子 純一

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, 2001**

編集兼発行 日本原子力研究所

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検討

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・金子 純一

(2000年10月25日受理)

大強度陽子加速器における強力パルス中性子ビームの散乱実験用として、ヘリウム-3 ガスを中性子有感物質とした高速 2次元中性子検出器 (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内には電離ガスを5~10気圧封入しなければならないため、これに耐える圧力容器が必要である。この圧力容器にはヘリウム-3 ガスに対する耐圧性及び密封性が要求されることは当然であるが、一方で高い検出効率と高い2次元位置分解能を達成するために、圧力容器の中性子入射窓には中性子の吸収及び散乱断面積が小さい材料を選択し、且つ可能な限り窓の板厚を薄くすることが求められる。上記のことから、最適な圧力容器構造を決めるため、3種類の中性子入射窓構造で圧力容器を設計し比較評価した。中性子入射窓面積が100X100mm、ガス圧力10気圧、窓材がアルミニウムの条件で、窓板厚2mmの圧力容器を製作可能であることを示した。

Study of Pressure Vessels for Micro-strip-gas-counters as  
Two-dimensional Neutron Position Sensitive Detectors

Hideshi YAMAGISHI and Junichi KANEKO

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

(Received October 25, 2000)

The development of two-dimensional position sensitive neutron detectors that have performances of a fast response and a very small space-resolution are required for various neutron scattering experiments using high-intensity pulse-neutron sources in a high-intensity proton accelerator facility. We put forward the development of a micro-strip gas counter (MSGC) filled with helium-3 gas as the two-dimensional position sensitive neutron detector. The MSGC requests a pressure vessel that withstands gas pressure of 5~10 atm. For obtainment of a small neutron-attenuation, the pressure vessel requires a neutron-window that is made thin wall and has small cross sections of absorption and scattering for low energy neutrons. We have studied and compared three kinds of neutron-windows for manufacturing the pressure vessel.

After the study, we were able to design the pressure vessel with neutron-window thickness of 2mm on conditions that are a window area of 100x100mm, material of aluminum and inner pressure of 10 atm.

Keywords: Neutron Detector, Neutron Imaging, Neutron Position Sensitive Detector, Neutron Two-dimensional Position Detector, Position Sensitive Detector, Neutron Scattering, Neutron Radiography

## 目 次

1. 序論	1
2. 圧力容器及び中性子入射窓の検討	2
2.1 設計条件	2
2.2 平板形圧力容器	2
2.2.1 平板形圧力容器構造の検討	2
2.2.2 中性子入射窓及び圧力容器の板厚設計	3
2.2.3 平板形圧力容器の重量	4
2.3 全半球形及びびさら形圧力容器	4
2.3.1 全半球形及びびさら形圧力容器の構造	4
2.3.2 中性子入射窓及び耐圧容器の板厚設計	5
2.3.3 全半球形及びびさら形圧力容器の重量	6
2.4 平板形、全半球形及びびさら形圧力容器の比較	7
3. 結論	8
謝 辞	9
参考文献	9

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Study of the Pressure Vessels and the Neutron-windows .....	2
2.1 Design Conditions required for the Pressure Vessels .....	2
2.2 Investigation of the Pressure Vessel with a Flat-board Window .....	2
2.2.1 Structure of the Pressure Vessel with a Flat-board-window .....	2
2.2.2 Design of Wall Thickness of the Neutron-window and the Pressure Vessel .....	3
2.2.3 Weight of the Pressure Vessel with a Flat-board-window .....	4
2.3 Half-ball-shape-window and Dish-shape-window .....	4
2.3.1 Structures of the Pressure Vessel with the Half-ball-shape-window or the Dish-shape-window .....	4
2.3.2 Design of the Wall Thickness of the Neutron-windows and the Pressure Vessels .....	5
2.3.3 Weight of the Pressure Vessel with the Half-ball-shape-window or the Dish-shape-window .....	6
2.4 Comparison of the Pressure Vessels with the Flat-board Window, the Half-ball-shape-window and the Dish-shape-window .....	7
3. Conclusion .....	8
Acknowledgment .....	9
References .....	9

## 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 ( $^3\text{He}$ ) ガス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 及び2に作動原理図としてMSGC計測システム構成とMSGCセンサ部を夫々示す。絶縁基板上に電極をプリントする方式のMSGC (主にX線等の低エネルギー放射線の検出に使用) は、微細加工技術の発達により電極間隔を数  $10\mu\text{m}$  以下の微小間隔で電極対を多数個絶縁基板上に高い精度で配置することも自由に行えること、さらに電極基板の製造コストも安価であるなどの利点を有している。その上、微小間隔で配置した電極対構造は、位置検出分解能を数  $100\mu\text{m}$  以下に高めることも可能にし、さらに、陽極ストリップ近傍のガス増幅作用によって発生したイオン群を近接して配置された陰極ストリップに素早く収集できるため、高計数率計測を  $10^6$  cps 以上にできる等、飛躍的に性能を向上させることが可能である。MSGC計測システムは、上記のような優れた性能及び機能を有していることから、日本原子力研究所と高エネルギー研究所が共同で建設を進めている大強度陽子加速器のパルス中性子散乱実験施設における高速、高位置分解能型2次元中性子検出器として、その開発が大きく期待されている。

従来のX線検出用MSGCでは、X線の電離ガス中飛程が微小であることから電離ガスを加圧する必要がなく、Fig.3 に示すようにガスフロー方式を採用している。この結果、ガス容器は密閉構造の必要もなく、さらにX線入射窓もX線の減衰を最小限にする薄膜マイラーフィルムを使用可能等、ガス容器に関する問題は殆どない。しかし、中性子検出用MSGCでは5~10気圧の高圧ヘリウム-3混合ガスを封入するための圧力容器が必要であるが、一方で圧力容器の中性子入射窓は中性子の吸収、散乱を極めて少なくしなければならないという相反する構造設計が要求される。本稿では、MSGC圧力容器の構造と3種類の中性子入射窓について設計を行い、比較評価を行ったのでその結果を報告する。

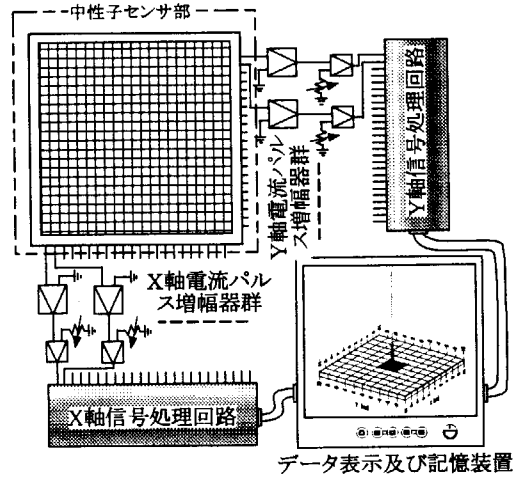


Fig.1 Schematic diagram of 2 dimensional neutron measuring system with the MSGC

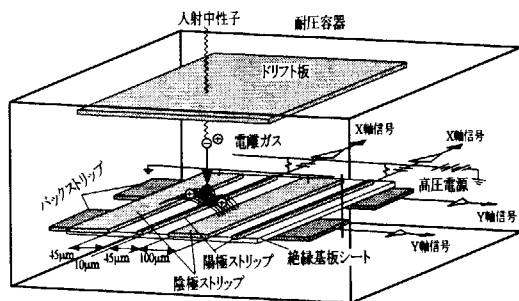


Fig.2 Principle of the MSGC for 2 dimensional neutron measuring

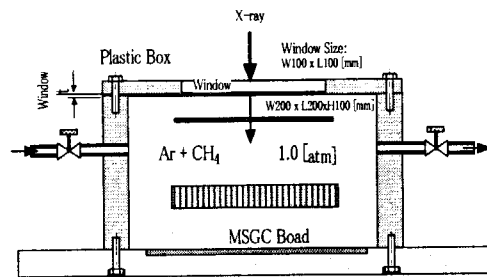


Fig.3 Schematic structure of the MSGC with a gas vessel for measuring X-ray

## 2. 圧力容器及び中性子入射窓の検討

### 2.1 設計条件

中性子検出用MSGCの圧力容器として、耐圧仕様が5~10気圧、ガスリークがヘリウムリークで $10^9 \text{ atm} \cdot \text{cc}/\text{sec}$ 以下の気密シール構造を確保できる圧力容器について検討を行った。MSGC電極基板の中性子検出有効面積は $100 \times 100 \text{ mm}$ として圧力容器の容積を決めた。設計を試みた圧力容器の構造は、中性子入射面の形状が平板形、全半球形及びさら形の3種類である。MSGC圧力容器の中性子入射窓には中性子の減衰及び散乱をできる限り小さくすることが要求される。このため、窓材には中性子の吸収及び散乱断面積が小さいアルミニウムを選び、その内で許容引張応力の比較的大きなA5083P H32を用いることにした。また圧力容器構造材には許容引張応力の大きなステンレススチール(SUS316)を夫々選択した。圧力容器の耐圧強度はJIS規格(JIS B8243)に準拠して計算した。温度 $0 \sim 40^\circ \text{C}$ の範囲におけるA5083P H32とSUS316の許容引張応力にはJIS規格(JIS B8243)値から夫々8及び $13.1 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ を使用した。

### 2.2 平板形圧力容器

#### 2.2.1 平板形圧力容器構造の検討

平板形圧力容器はFig.4に示したように箱型をしており、中性子入射対向面が平板形で、中性子入射窓部の板厚のみを薄くした構造のものである。この圧力容器は中性子入射窓が平板であるため、窓の厚みが厚くなる欠点を持っているが、構造が最も簡単であり、製作コストが低い優位性を持っている。圧力容器の内側寸法を $W150 \times L150 \times H80 \text{ mm}$ 、中性子入射窓の寸法を $W100 \times L100 \text{ mm}$ としてMSGC用の箱形圧力容器の設計を行った。Fig.5に平板形圧力容器の断面構造を示した。平板形圧力容器の中性子入射対向面、即ち容器のキャップ部は中性子の吸収及び散乱断面積の小さいアルミニウム(A5083P H32)とした。MSGC収納箱部の金属材料はフィードスルーコネクタの溶接取付け及び耐圧強度を考慮してステンレススチール(SUS316)を使用することとした。中性子入射窓フランジとMSGC収納箱部間の気密シールはメタルパッキンを用いて行うこととした。

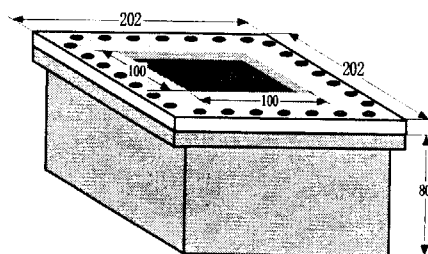


Fig.4 Outline of a pressure vessel being a box-shape for the MSGC

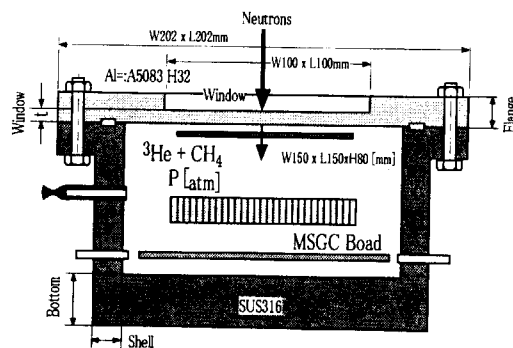


Fig.5 Schematic structure of the MSGC with a pressure vessel for measuring neutrons



2.2.2 中性子入射窓及び圧力容器の板厚設計

中性子入射窓、容器胴及び底板の板厚は J I S 規格 JIS B 8243 の式 1 を用いて計算した。

$$t = d \sqrt{\frac{ZCP}{100\sigma_a}} \text{-----(1)}$$

$$Z = 3.4 - 2.4 \frac{d}{D} \text{ (最大2.5)}$$

ここで t : 平板の計算厚さ(mm)、P : 設計圧力(kgf/cm<sup>2</sup>)、d : 最小スパン(mm)、σ<sub>a</sub> : 材料の許容引張応力(kgf/mm<sup>2</sup>)、D : 最小スパンに直角に測った最大スパン(mm)、C : 平板の取付方法によって決まる定数である。

キャップフランジの板厚は J I S 規格に従い式 2 を用いて計算した。

$$t = G \sqrt{\frac{ZKP}{100\sigma_a} + \frac{6Wh_G}{\sigma_a LG^2}} \text{-----(2)}$$

ここで、G : パッキンの最小スパン、D : パッキンの最大スパン、L : ボルト穴の中心円を結んだ時の周の長さ(mm)、K : 定数で 0.3、W : 下記の式 3 で示すボルト荷重(kgf)、h<sub>G</sub> : モーメントアーム(mm)で h<sub>G</sub> = (G-ボルトのピッチ円) / 2 である。Z は式 Z=3.4-2.4G / D で与えられる。

$$\text{ボルト荷重計算式 } W = H + H_p = \frac{\pi}{400} G^2 P + \frac{2\pi b}{100} GmP = \frac{\pi GP}{400} (G + 8bm) \text{-----(3)}$$

ここで、b : パッキンの有効幅 (JISB 8243 付属書 2、表 1)、m : パッキンの係数 (JISB 8243 付属書 2、表 2) である。

圧力容器内に封入するガス圧力を変数として圧力容器各壁板に安全上必要とされる板厚を計算した。計算結果を Fig.6 に示す。計算した壁板は中性子入射窓(Window)、圧力容器キャップのフランジ(flange)、胴部(Shell)及び底板(Bottom)である。寸法 100 x 100mm の中性子入射窓の板厚は、当然のことであるが、封入ガス圧力を高くするに従って厚みを増加させなければならないことを示しており、ガス圧が 5 気圧で 4.6mm、8 気圧で 5.8mm、10 気圧にすると 6.5mm 必要となる。キャップのフランジの厚みは、その面積が 202 x 202mm

で広い結果、かなり厚く取らないといけないことがわかる。フランジの厚みは中性子の 2 次元分布計測に影響を与えないが、容器重量を増加させる要因になる。板厚はガス圧が 5 気圧で 10mm、8 気圧で 13mm、10 気圧にすると 14.4mm 必要となる。圧力容器胴部の板厚計算結果では、金属材料に SUS316 を用いていること及び胴部の高さが 80mm であり幅 150mm と比較して短いことから比較的薄い板厚で良いことがわかる。板厚はガス圧が 5 気圧で 3.3mm、8 気圧で 4.2mm、10 気圧にすると 4.7mm

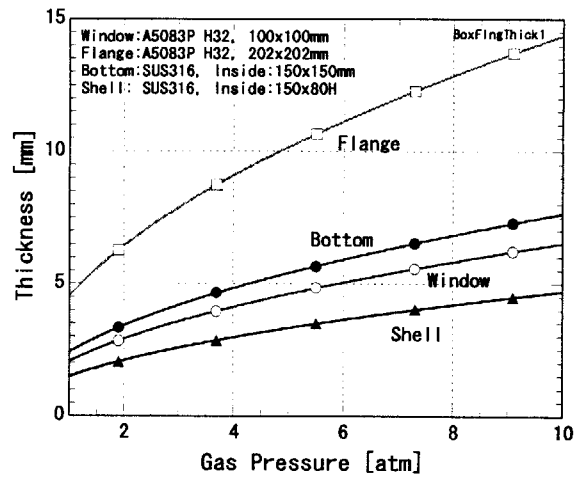


Fig.6 Calculated the thickness of each wall of a pressure vessel for the MSGC

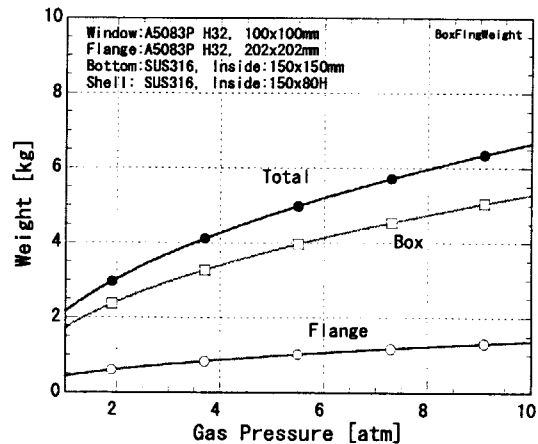


Fig.7 Calculated weights of the pressure vessel for the MAGC

となる。底板は材料を SUS316 にしているが面積が 150 x 150mm と広いので、胴部と比較してかなり厚い板を用いる必要がある。板厚はガス圧が 5 気圧で 5.4mm、8 気圧で 6.8mm、10 気圧にすると 7.6mm 必要となる。

### 2.2.3 平板形圧力容器の重量

MSGC 圧力容器の重量は、計測電子回路群への取付け方法及び中性子測定実験における MSGC の操作性等から、なるべく軽量であることが望ましい。上記の圧力容器各部の壁厚の計算結果を用いて、圧力容器キャップ、箱形容器部及び圧力容器組立て後の重量を概算した。計算結果を Fig.7 に示した。圧力容器キャップはガス圧力を 10 気圧にしても 1.4kg 以下であり、操作性に問題はない。箱形容器部では底板と胴部板の両重量は近い値であった。箱形容器部のみの重量はガス圧力が 10 気圧で 5.3kg になった。圧力容器トータルの重量はガス圧力が 5 気圧で 4.8kg、8 気圧で 6kg、そして 10 気圧にすると 6.7kg の重さになることがわかった。

## 2.3 全半球形及びさら形圧力容器

### 2.3.1 全半球形及びさら形圧力容器の構造

中性子散乱実験における熱中性子以下の極低エネルギー中性子の 2 次元分布計測では、中性子入射窓での吸収及び散乱を極力小さくすることが重要である。この要求を満たすには、中性子が入射する方向に対向した検出器圧力容器の壁の金属材料を選定することと壁厚を薄くすることが有効である。中性子入射対向面の壁材には中性子の吸収及び散乱断面積の比較的小さいアルミニウム(A5083P、H32)を用いることにして、さらに壁厚を薄くするため、中性子入射対向面の圧力容器形状に全半球形またはさら形を採用した圧力容器の設計検討を行った。これらの圧力容器は、前記した箱形圧力容器の中性子入射窓の前面に、圧力バウンダリーを形成する薄い板厚でできた全半球形またはさら形の圧力容器キャップを設け、平板の中性子入射窓の板厚を薄くすることを目指したものである。Fig.8 及び 9 に夫々全半球形とさら形圧力容器の断面構造図を示す。当然のことであるが、圧力容器キャップの形状を完全な半球形に近づけるほど応力の集中する部分が少

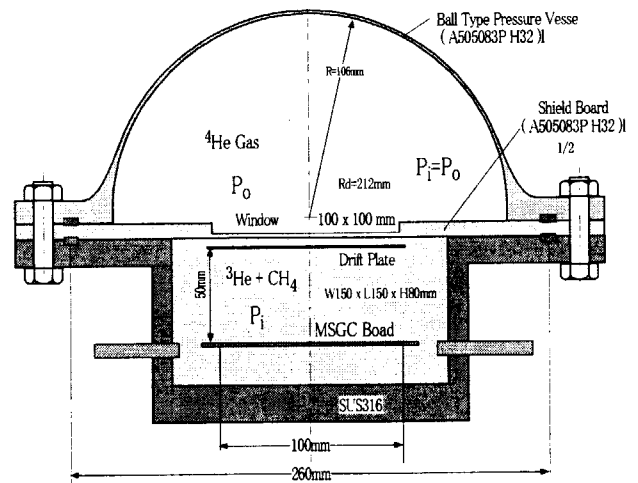


Fig.8 Schematic structure of a pressure vessel with a half-ball-cap for the MSGC

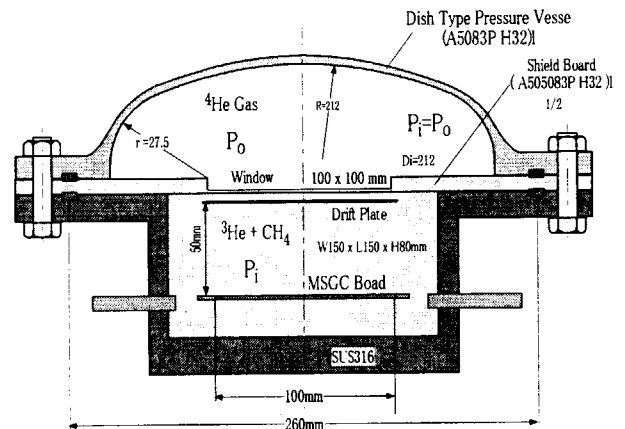


Fig.9 Schematic structure of a pressure vessel with a dish-shape-cap for the MSGC

なくなる結果、圧力容器の板厚を薄くすることができる。Fig.8 と 9 に示したように全半球形とさら形圧力容器では、容器内側に平板形中性子入射窓を設けて、MSGC基板を収納するチェンバ内にはヘリウム-3 の混合ガスを封入して、曲面をもった外側にはヘリウム-3 混合ガス圧力と同じ圧力のヘリウム-4 ガスを封入する二重構造を採用している。この理由は、圧力容器内側の平板形中性子入射窓を設けず全体にヘリウム-3 混合ガスを封入した場合に、並行ビーム状中性子の入射位置によってヘリウム-3 混合ガス層の厚みが異なって、中性子検出感度に違いがでることを避けるためである。容器内側に設ける平板形中性子入射窓は取付けのための平板フランジと一体構造とし、窓の寸法をMSGCの有効計測面積と同じ

100x100mm にして、窓部のみの板厚を薄くした構造とした。MSGC電極基板を収納する容器部は、内側寸法が W150xL150xH80mm で、箱形圧力容器と同じにした。金属材料も SUS316 で同じである。全半球形とさら形圧力容器で異なるのは、圧力バウンダリーを形成するキャップ部の構造だけである。Fig.10 に中性子入射方向から見た全半球形及びさら形圧力容器の平面図を示した。全半球形及びさら形キャップ部の開口部の直径はMSGC電極基板を収納する箱容器部の前面をカバーするように 212mm とした。ガスを封じる金属パッキンの径を 260mm とし、フランジの外径は 320mm とした。

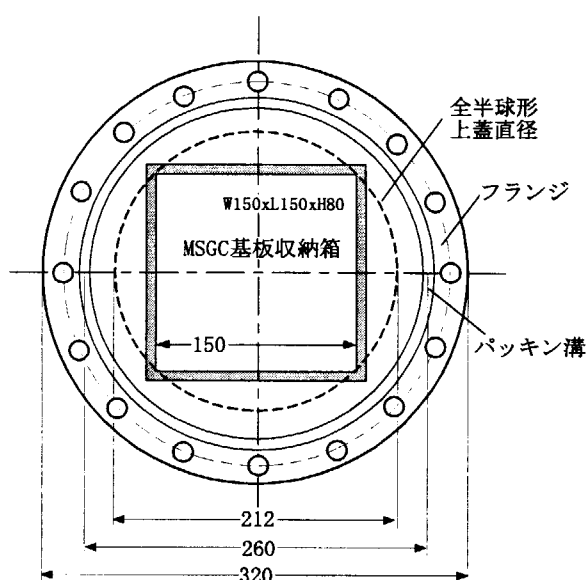


Fig.10 Dimension of a flange welded to a box for installing the MSGC

### 2.3.2 中性子入射窓及び耐圧容器の板厚設計

封入ガス圧を変えて全半球形及びさら形圧力容器のキャップ部とフランジ部に必要な板厚を計算した。計算式には下記に示す J I S 規格 JIS B 8243 の式 4 を用いた。

$$t = \frac{PRW}{200\sigma_a\eta - 0.2P} \text{----- (4)}$$

ここで  $t$ : 鏡板の計算厚さ(mm)、 $P$ : 設計圧力(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $R$ : 腐れ後のさら形鏡板の中央部内面の半径又は全半球形鏡板の内面の半径(mm)、 $W$ : さら形の形状による係数で、次の算式による。

$$W = \frac{1}{4} \left( 3 + \sqrt{\frac{R}{r}} \right)$$

$r$ : さら形鏡板のすみの丸みの腐れ後の内半径(mm)、 $\sigma_a$ : 材料の許容引張応力(kgf/mm<sup>2</sup>)、 $\eta$ : 鏡板の溶接継手効率

各部板厚の計算結果を Fig.11 に示す。全半球形の方がさら形よりも薄い板厚で製作できることを示している。全半球形とさら形の板厚を封入ガス圧毎で比較すると、5atm では夫々 0.27 と 0.38mm、8atm では 0.46 と 0.66mm、そして 10atm では 0.6 と 0.85mm である。上記のように圧力

容器を全半球形またはさら形にすると 10atm の圧力でも 0.85mm 以下の薄い板厚で十分であることがわかる。計算結果から全半球形とさら形の板厚の違いは 10atm でも 0.25mm で、小さいことがわかった。キャップフランジ部の板厚は 5atm で 12mm、8atm で 16mm そして 10atm では 18mm 必要である。

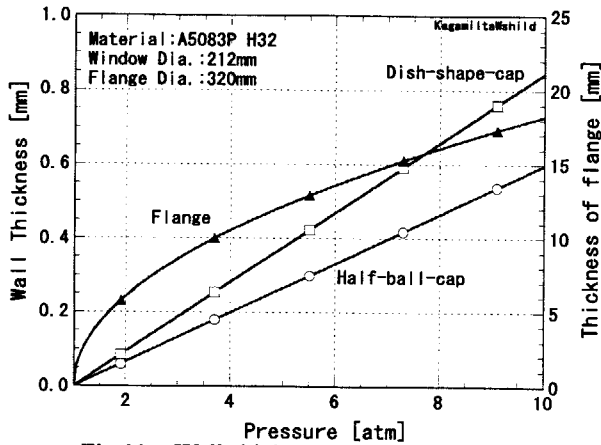


Fig.11 Wall-thicknesses of a half-ball-cap, a dish-shape-cap and the flange

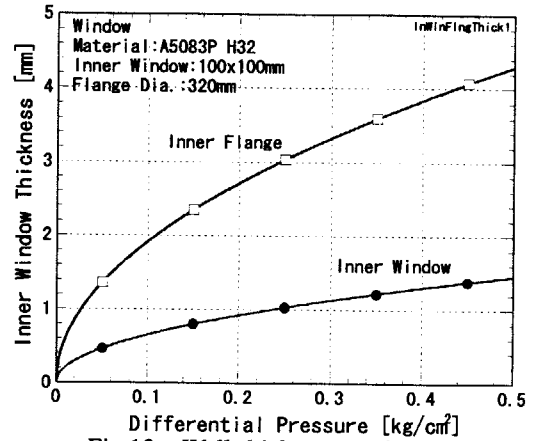


Fig.12 Wall-thicknesses of an inner-window and the flange

先に説明したように、全半球形及びさら形キャップ構造で製作する圧力容器では、中性子感度即ち封入されるヘリウム-3 混合ガス層の厚みを一定にするため、圧力容器内部にヘリウム-3 混合ガスを仕切るための Inner Window (仕切板) が必要である。MSGC 電極基板収納側の Inner Window 面はヘリウム-3 混合ガスで、もう一方の面をヘリウム-4 ガスにより同圧力で加圧され、圧力バランスが図られるので、計算上では耐圧強度を必要としない。しかし、ガスを Inner Window 両面のチェンバ内に加圧する際に少々の差圧がかかることを許容する必要がある。上記のことから、ガス差圧に対する Inner Window 及びそのフランジに必要とされる板厚を計算した。計算結果を Fig.12 に示す。許容ガス差圧を 0.2、0.3 及び 0.4kg/cm<sup>2</sup> とした場合に Inner Window 及びフランジの板厚は、夫々 0.923 と 2.72mm、1.13 と 3.33mm 及び 1.31 と 3.84mm が必要であることを示している。以上の計算結果から、Inner Window の板厚は 1mm 程度あれば十分であることがわかった。

### 2.3.3 全半球形及びさら形圧力容器の重量

圧力容器の操作性を調べるため、容器の重さを計算した。Fig.13 は全半球形キャップとさら形キャップの重量を封入ガス圧の関数として計算し比較したものである。キャップの形状が変わっても両者の重量には殆ど差がない。これはキャップの重量が取付用フランジの重量でほぼ決まっているためである。キャップの重量はガス圧が 5atm で約 1.5kg、8atm で約 2kg そして 10atm で 2.3kg になった。この程度の重さであれば操作に全く支障がないといえる。Fig.14 はさら形キャップの圧力容器の各部重量と総重量の計算結果を示したものである。全半球形とさら形ではMSGC 電極基板収納箱と Inner Window の形状及び材質が同一であることから重量も同じである。また Fig.13 からキャップの重さも殆ど同じであるから、Fig.14 の計算結果は全半球形圧力容器の各部品重量とみなしても差支えない。総重量は 5atm で約 7.8kg、8atm で約 7.8kg、8atm で約 10kg そして 10atm では約 11.3kg となることがわかった。

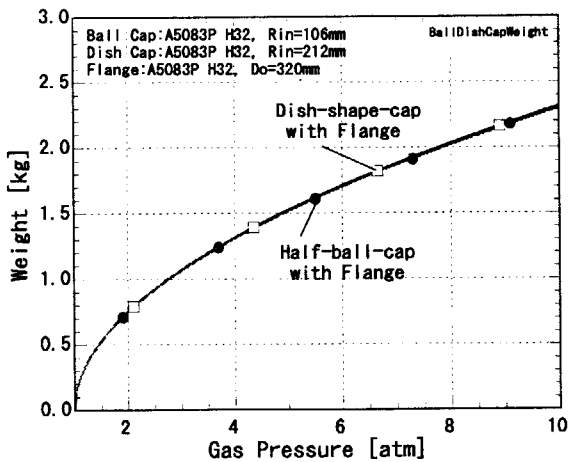


Fig.13 Estimated weights of pressure vessel caps with a half-ball-shape or a dish-shape

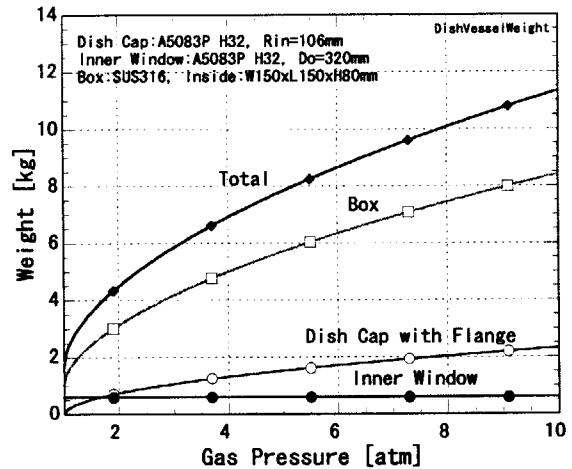


Fig.14 Estimated weights of parts for the pressure vessel with a dish-shape-cap

#### 2.4 平板形、全半球形及びさら形压力容器の比較

Fig.15 に封入ガスの圧力により必要となる中性子入射窓の板厚を 3 種類の構造で比較して示した。ガス圧を 5atm にした場合の平板形、全半球形及びさら形の窓板に必要な厚みは夫々 4.6、1.2、1.3mm であった。ガス圧を 8atm にすると板厚は夫々 5.8、1.7、1.9mm であり、10atm にすると 6.5、2、2.2mm が必要となる。平板形窓では板厚が最大 6mm 必要となり、入射中性子の減衰の観点から実用上支障が生じることが懸念される。全半球形とさら形では板厚の違いは僅かであり、2mm 程

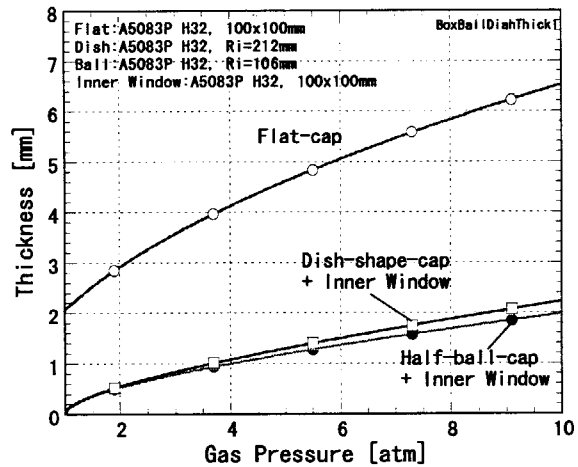


Fig.15 Comparison between thickness of windows being a flat, half-ball and dish shape

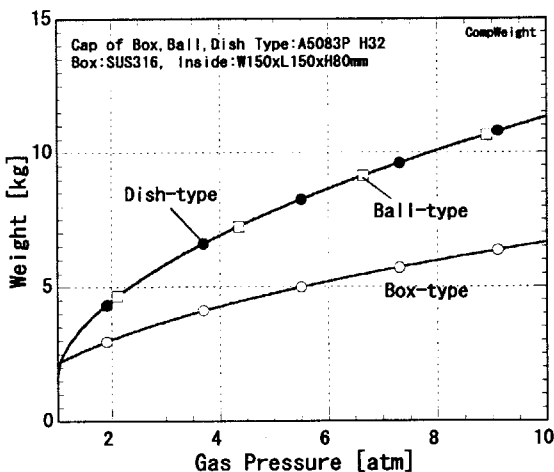


Fig.16 Comparison between weight of pressure vessels with a flat-cap, a half-ball-cap and a dish-shape-cap

度でよいことがわかった。両者の比較では、Inner Window 両面の圧力バランスに必要なヘリウム4ガス層の厚みを考慮すると、さら形構造の压力容器の方が優れていることがわかった。

MSGC用压力容器の操作性を評価するため、上記で述べた 3 種類の構造で製作した場合の総重量を比較して示した。平板形は構造がシンプルであることから、5~7kg で最も軽く操作性が良いことがわかった。全半球形またはさら形で製作しても両者間の重量に殆ど差異がなく、8~11kg の重さで製作できることがわかった。

### 3. 結 論

中性子 2 次元検出用 MSGC の開発試験に使用するため、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の設計を行った。平行ビームで入射する中性子の 2 次元分布を高精度で計測するためには、検出器の中性子入射窓には中性子吸収及び散乱断面積の小さな材料を選定すること、さらに中性子入射窓の板厚を可能な限り薄くすることが重要である。このため、中性子入射窓は中性子の吸収及び散乱断面積の小さなアルミニウム A5083P H32 を用いて製作し、MSGC 電極基板収納容器部は SUS316 で製作することにした。それで、中性子入射窓の形状を平板形、全半球と薄平板の組合せ及びさら形と薄平板の組合せの 3 種類で設計し、中性子入射窓の厚さ及び総重量について比較、検討した。

比較検討の結果、中性子入射窓の板厚及び容器重量から総合して評価すると、重量が平板形より 3～4 kg 重くなるが、さら形で中性子入射窓を設計することにより、ガス圧力が 5～10atm の範囲で 1.2～2.2mm の極めて薄い窓厚にすることが可能であり、中性子の 2 次元分布計測のために最も適していることがわかった。

## 謝 辞

MSGC用の圧力容器の設計では、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の使用環境及び条件等についてご教授頂いた日本原子力研究所・中性子科学研究センター・副主任研究員の曾山和彦氏及び同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. 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
2. 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
3. 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
4. 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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>
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
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
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<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> 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
ガロン	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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 <sup>5</sup> 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/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1		0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
9.80665		1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
3.6 × 10 <sup>6</sup>		3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
4.18605		0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
1055.06		107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
1.35582		0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>		1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	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 <sup>-11</sup>
3.7 × 10 <sup>10</sup>		1

吸収線量	Gy	rad
1		100
0.01		1

照射線量	C/kg	R
1		3876
2.58 × 10 <sup>-4</sup>		1

線量当量	Sv	rem
1		100
0.01		1

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検討