研究論文

格子型フレームによるガスフローカウンタの
薄窓膜強化法に関する一考察佐藤博夫*¹, 吉住 実*¹, 小谷野明*¹, 大脇成裕*²

(1984年7月16日受理)

(1984年12月26日再受理)

A Study for Strengthening of the Thin Window Using the Latticed Frame
for Gas Flow CounterHiroo SATO,*¹ Minoru YOSHIKUNI,*¹ Akira KOYANO*¹ and Shigehiro OWAKI*¹

To strengthen the thin window of a proportional gas flow counter which is capable to detect low energy β -ray such as tritium is described. The window film is made of alkyl-benzene whose thickness is extremely thin (0.15 mg/cm^2) and has large surface ($30 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$). In order to strengthen the window without increasing the thickness of the film, a latticed frame was installed to support the window film. Calculation for approximating of strengthening of the thin window was discussed. Mechanical strength of the window was estimated to withstand a pressure difference 66 times greater than that without the frame. It was also proved that the strength of the film by the pressure difference calculated agreed with that of experimental results with the accuracy of 10%. It is confirmed that the gas flow counter for measuring low energy β -ray developed in our laboratory, inspite of using the latticed frame, has identical counting efficiency without latticed frame.

KEY WORDS : thin window, latticed frame, gas flow counter, tritium, window film, alkyl-benzene, large surface, mechanical strength, counting efficiency

I 緒 言

低エネルギー放射線の測定にあたって、吸収層となる検出器の入射窓はできるだけ薄く、かつ、その面積を広くすることが望ましい。しかし、窓の機械的強度は逆に弱化するため、従来から、各種の強化策がとられてきているが、今後それらを、さらに確実なものとしていく必

要がある。

本報告は窓の強化策の検討を目的とし、実用機に適用できる設計や装置利用にあたり、その強度を把握するため、格子型フレームを採用した場合の機械的強度の計算法の確立について検討したものである。一方、本法の解析の妥当性を調べるため、超薄窓ガスフローカウンタ（以下試作ガスフローカウンタとする）を試作し強化前後の耐圧比較試験を行った。

トリチウムからの β 線は最大エネルギーでも 18.7 keV ¹⁾ と低く、空气中最大飛程は数 mm 相当である。したがって、窓は十分薄い約 0.15 mg/cm^2 以下とし、窓面 $30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ と大きくしている。さらに、この膜は放射線が検出部内へ一様に透過するよう厚さを均一にし、計数ガスや空気の漏洩を生じ異常動作を起す原因

*¹ アロカ株式会社研究所；東京都三鷹市牟礼 6-22-1(〒181) Research and Development Laboratory, Aloka Co., Ltd.; 6-22-1, Mure, Mitaka-shi, Tokyo.

*² 大阪大学産業科学研究所；大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1 (〒567) The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University; 8-1, Mihogaoka, Ibaragi-shi, Osaka.

となるピンホールがほとんどないアルキルベンゼン系の高分子膜からなっている。

この検出器はトリチウム測定にあたっては窓面と被測定面との間隔を1mmに保ち、移動しながら行うにする。超薄窓は測定位置から急激に検出器を引き離したり、あるいは、窓面を測定面へ急接近させると、その間隔の空気を減圧あるいは圧縮することになり、衝撃圧として超薄窓を破損するおそれもある。そこで、測定操作は動作を緩やかに行う必要があった。しかし、使用時に特別な配慮をする必要がないことが望ましく、窓は衝撃圧に十分耐えられるようにするものである。

窓の強化解析および比較試験の結果、格子型フレーム法を採用することにより、約65倍の強化が得られる。また、衝撃試験として落下試験を行い、破損のないことを確認し、本法が有効であることを実証評価した。さらに、トリチウム β 線の自己吸収が無視でき、かつ、入射窓面積より十分に大きいトリチウム面線源を製作使用し、格子型フレームを採用しても、特性の劣化や β 線検出効率等にほとんど変化がないことを確認した。これらより本法が薄窓の強化に有効であることが実証された。

II 理 論

1. 薄窓の構造

格子型フレーム法は広くガスフローカウンタの窓の強化に利用される。したがって、その強化の計算対象も一般性のあるものとし、その計算の展開や強化の実証には1例としてFig. 1の構成からなる試作ガスフローカウンタの窓について行う。

このカウンタはFig. 1の検出部の下部を占め、箱状壁部を陰極とし、2本の陽極を設けたものからなる。

そこへ計数ガスとしてPRガス（アルゴン+10%メタン）をガス導入管から流通させ、放射線を検出する。窓となる 0.12 mg/cm^2 （窓を陰極とするため、 0.03 mg/cm^2 の金をさらに蒸着する）アルキルベンゼン系膜はフランジA₁の開口部 $30 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ に接着され、窓面全体がその縁で支持される。

強化窓はFig. 2に示すごとく、薄膜を2枚の格子枠（格子間隔1mm、格子幅0.1mmステンレス製枠）の保護格子間にサンドイッチ状に接着支持し、その状態のものをフランジA₂に同様接着する。したがって、フランジA₂の開口部を多数の独立した小窓とし、耐圧を個々の小窓にそれぞれ持たせる構造とした。

2. 薄窓の機械的強化の計算

計算解析は薄窓全面をフランジA₁に支持する強化前の場合と格子枠で小窓とした場合の膜の破断圧力の比を

Fig. 1 Illustration of the counting probe.

解析計算し、窓の強化率を求める。膜の両面の圧力差 ΔP はFig. 3に示す膜面の張力 T に対して法線方向に働き膜を湾曲させる。曲面の主曲率半径が矩形辺の長さ ζ_1, ζ_2 に比較し、大きく、中心角 α_1, α_2 が小さい場合四つの辺は円弧の一部に近似され、膜を支持する長さになる²⁾。

矩形の対辺ごとの張力は $T\zeta_1, T\zeta_2$ と表わされ、対辺ごとの合力は膜面の法線力として、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} 2T\zeta_1 \sin(\alpha_2/2) &= T\zeta_1\alpha_2 \\ 2T\zeta_2 \sin(\alpha_1/2) &= T\zeta_2\alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

圧力差 ΔP により与えられる矩形の法線方向の力は $\Delta P\zeta_1\zeta_2$ であるから、(1)式の力とのつり合いで次式が成り立つ。

$$\Delta P = T(\alpha_1/\zeta_1 + \alpha_2/\zeta_2) \quad (2)$$

α_1, α_2 は圧力差 $\Delta P=0$ の状態からの突出距離 ξ で表わすと $\alpha_1 \doteq 4\xi_1/\zeta_1, \alpha_2 \doteq 4\xi_2/\zeta_2$ となる。

さらに、膜面の窓枠支持をF、格子枠支持をLとして添字を付けると、(2)式の圧力差 ΔP はそれぞれ次の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_F &\doteq 4T(\xi_F/\zeta_F^2 + \xi_F/\zeta_F^2) \\ \Delta P_L &\doteq 4T(\xi_L/\zeta_L^2 + \xi_L/\zeta_L^2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

格子枠の突出距離 $\xi_L = \xi_{L1} + \xi_{L2}$ は辺の長さ（正方形） $\zeta_{L1} = \zeta_{L2} = 0.9 \text{ mm}$ としたことから $(\xi_L/2) = \xi_{L1} = \xi_{L2}$ と

Fig. 2 Illustration of the latticed frame (A_2) with thin film.

Fig. 3 Illustration of tensile force to be caused by pressure difference between the two sides of film.

なる。

一方、窓枠支持の辺の長さの関係を $\zeta_{F1} < \zeta_{F2}$ ($\zeta_{F1} = 30 \text{ mm}$, $\zeta_{F2} = 150 \text{ mm}$) とおくと $(1/\zeta_{F1}^2) \gg (1/\zeta_{F2}^2)$ となり $1/\zeta_{F2}^2$ は省略できる。さらに突出距離 ξ_F は $\zeta_{F1} \ll \zeta_{F2}$ となるに従い短辺間の張力に依存することからフランジ A_1 の構造のものでは $\xi_F \approx \xi_{F1}$ とすることができ、(3)式から強化率が次式のようになる。

$$\frac{\Delta P_L}{\Delta P_F} \approx \frac{\zeta_{F1}^2 \xi_L}{\zeta_{L1}^2 \xi_F} \quad (4)$$

2方式の破断時の各突出距離と各辺の長さとの比(単位伸び率)は同等と仮定できることから $(\xi_F/\zeta_{F1}) = \xi_L/2\zeta_{L1}$ が成立し、この関係を(4)式に代入して式を整理する。

$$\frac{\Delta P_L}{\Delta P_F} \approx \frac{2\zeta_{F1}}{\zeta_{L1}} \quad (5)$$

強化率は最終的に(5)式から各辺の長さだけの関係として求まる。すなわち強化前後の辺の長さをそれぞれ(5)式に代入し、計算すると強化率は66倍となり、強

化が大幅に向上することが近似的に求まる。

III 実 験

1. 強化試験

1.1 破断圧力試験

格子型フレーム法とすることにもなる窓の強化は既述の計算から求められる一方、ここでは実験から膜のそれぞれ破断する圧力を測定し、その比、すなわち、強化率を求め、近似計算の実証を行った。

1.1.1 測定系

強化前の窓の破断圧力測定は一方の膜面の気体を加圧して行う。すなわち、Fig. 4 のごとく、カウンタ自身を圧力容器として用い、フレーム A₁ を供試部とする。このカウンタ内へ PR ガスを Fig. 4 の系統で注入加圧し、昇圧にともなう膜の破断時の圧力を測定する。なお、その圧力はカウンタの計数ガス放出口に水マンオメータを設け実測した。

格子型フレーム取付後の窓の破断圧力は計算から、強化前より約 66 倍高いことが予想されるため、加圧試験中、強化のための格子型フレーム（厚さ 0.05 mm）にも変形を生じ、膜の破断に別の要因を与える。そこで、この膜の破断は 0.9 mm の個々の窓の破断に起因するため、格子型フレームの変形の影響をできるだけ小さくす

Fig. 4 Block diagram of the system for the test of elongation to break.

Table 1 Break test of the thin film.

No.	Gas flow counter	
	Without the latticed frame (kg/cm ²)	With the latticed frame (kg/cm ²)
1	1.2×10^{-2}	6.4×10^{-1}
2	9.5×10^{-3}	6.5×10^{-1}
3	9.8×10^{-3}	6.8×10^{-1}
4	1.02×10^{-2}	7.6×10^{-1}
5	8.8×10^{-3}	6.1×10^{-1}
6	9.6×10^{-3}	8.0×10^{-1}
Mean $\pm$ S.D. $(1.0 \pm 0.1) \times 10^{-2} \quad (6.9 \pm 0.7) \times 10^{-1}$		

る Fig. 5 に示す、一端が開口された内径 12 mm の円筒の端部へ強化窓を接着し、円筒内を既述同様に加圧して破断圧力を測定した。なお、円筒内圧力は水銀 U 字管マンオメータにより測定した。

1.1.2 測定

破断圧力測定は強化前後の窓各 6 枚について実施した。その圧力値を Table 1 に示した。この測定において、加圧は破断まで 1 回で行っている。すなわち、加圧により膜に変形が残し、2 回以後の加圧では変形状態から加圧が始まるため、破断圧力が低下し、本測定に支障となるからである。

加圧時の窓面の変形は強化前の窓の場合、Fig. 6 のごとく、長辺の両端部を除けば、ほぼ円筒壁の一部を形成するように突出し、その突出距離は約 4 mm にまで達していた。一方、強化後の窓の場合、格子型フレームも約 2 mm 外方へ突出し、変形が残し、膜も同様各格子内で突出し、破断は単一のフレーム内で生じていた。

1.2 落下試験

通常の使用で窓膜に与えてはならない衝撃圧に強化窓

Fig. 5 Illustration of the pressure vessel for the test of elongation to break.

Fig. 6 Illustration of the swelling of film by pressure.

が耐えられるか、以下の落下試験を実施した。

1.2.1 試験系

落下はゴムマット（厚さ 10 mm）上へ、強化窓を設けた検出部の窓面が面着する状態でを行い、窓面への衝撃圧はマットと窓面間の空気を急激に圧縮し、窓面を加圧することにより与える。その結果、窓の破断の判定は目視によるものと検出部に計数ガスを流通し、ガスもれ量の有無をガス流入出口にそれぞれ設けたバブラー流量計を用いて測定した。

1.2.2 試験

落下高さは使用時落下が予想される 0.2, 0.3, 0.4 m とし、試験は順次それぞれの高さについて各 10 回行い、落下試験の都度、目視とバブラー流量計で調べ、破断が検知されなかった。これより、強化窓はこの落下高さでは十分耐えることが確認された。

2. 窓の強化前後の特性試験

窓の強化にともなう特性変化を調べるため、以下の試験を行った。

2.1 試験系

試験は試作カウンタを用いて実施した。強化前の窓の厚さは 0.15 mg/cm^2 (0.03 mg/cm^2 金蒸着含む) であり、 A_2 にはとくに保護格子を用いずに行った。

強化後の窓は Fig. 2 の構成の A_2 からなり、窓厚は 0.12 mg/cm^2 (金蒸着なし) である。 A_2 に用いられた格子型フレームは既述のものであり、この窓を強化前の

窓と交換して試験を行った。

計測は測定誤差を小さくするため、レートメータへ入力する信号を計数装置へ切り換えて測定した。計数ガスは PR ガスを用い、その流量は 60 ml/min とした。トリチウム面線源³⁾ はステアリン酸果積膜からなり、大きさ $50 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 、線源面密度 $(3.9 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ Bq/cm}^2$ の自己吸収の無視できるものである。この線源を用い窓面との間隔を 1 mm とした。

2.2 各種特性試験

窓の強化前後におけるカウンタの諸特性試験として、プラトー曲線を求め、それよりプラトー長、その傾斜、使用電圧を得た。結果をそれぞれ Table 2 に示した。さらに、この結果を基に検出効率をトリチウムについて求めた。

IV 考察

1. 強化の計算と強化試験

格子型フレーム法により大幅な窓の強化を図るため、実施した計算による強化率と試作窓の強化試験に基づく値はほぼよい一致を示した。すなわち、前者の強化率は 66 倍、後者は Table 1 より求め、 69 ± 10 倍となっている。後者は前者に比較し、5% 程度大きい誤差範囲内であり、計算が適切、有効であることを実証している。窓の強化計算は強化前後の膜に破断圧力が加わる状態で行われ、近似仮定した複雑な事項が最終的に(3)式の各共通項で相殺され、膜支持状態の辺の長さからなる(5)式に整理される。これは計算を容易とするとともに、近似が適切であったことになる。

1.1 計算と近似仮定

窓膜に加わる圧力は膜を支持するフランジの直線からなる 4 辺の長さとの関係で張力で曲面を生じる。そこで Fig. 3 に示すごとく、各辺をそれぞれ破断圧力付加時

Table 2 Plateau characteristics and tritium- β ray counting rate.

Measuring condition : 60 ml/min counting gas flow rate and 1 mm air distance from window film to tritiated specimen.

		Gas flow counter	
		Without the latticed frame	With the latticed frame
Plateau length	(V)	1,900-2,200	1,950-2,200
Plateau slope	(%/100 V)	5	6
Operating voltage	(V)	2,000	2,000
Counting rate	(c/m)	$11,000 \pm 100$	$11,800 \pm 100$
		window thickness : 0.15 mg/cm^2 including gold film 0.03 mg/cm^2	window thickness : 0.12 mg/cm^2

に形成する曲面の円弧の一部とし、圧力を曲面の法線力として計算したことは計算値と実測値がほぼ一致したことから妥当であり、かつ、式を簡略化するのに有効であった。

(3)式から(4)式への展開でフレーム支持の辺の長さが $\zeta F_1 < \zeta F_2$ (強化試験に用いた窓では $30\text{ mm} < 150\text{ mm}$) である場合、突出距離は $\xi F = \xi F_1$ とおき、長辺成分の突出距離は省略し、窓の破断を短辺に依存する式として結果的に影響なかった。

この突出距離はさらに次の関係で消去される。すなわち、(4)式から(5)式への移行では破断時の各突出距離と各辺の長さとの比(辺に対する伸び率)が同等 ($\xi F / \zeta F_1 = (\xi L / 2\zeta L_1)$) として、計算式から破断時の突出距離をすべて消去した。これにより実際に突出距離をそれぞれ測定せずに強化率が辺の長さだけで概略求まることから、窓の設計にあたって、強化率をあらかじめ推定できる有効な手段となった。

1.2 破断圧力試験

試験は既述の計算と関連させ、強化率が求まるよう行った。すなわち、強化前後のそれぞれの窓について破断圧力 (Table 1) そのものを実測し、その比をとることから、強化策の効果が倍率で具体的に求まり、計算方式との比較確認がとれ有効であった。

破断圧力測定において、強化前の窓膜は破断直前で約 4 mm 突出し、破断後、膜の伸び変形として残り、それ以下の圧力でも変化が予想されることから、破断圧力測定は既述の理由で、破断圧力まで1回の加圧で到達させたことは適切であった。

また、強化窓の破断圧力は Table 1 から約 0.7 kg/cm^2 である。窓全面 (45 cm^2) では約 32 kg と大きい。したがって、これを支持する格子フレームへの力も大きく、変形も予想され、膜の破断に別の要因を与える。そこで、破断圧力測定は Fig. 5 に示した直径 10 mm の窓面に限定して行い格子型フレームの変形の影響を小さくしたことは有効であった。

1.3 落下試験

試作カウンタは取扱い中に窓の薄膜に衝撃圧力を加えたり、接触破損を加えない限り使用に十分耐える。すなわち、その状態で薄膜への圧力差は Table 1 に示す窓の強化前の破断圧力 0.01 kg/cm^2 より低い状態である。一方、強化窓については破断圧力が約 0.7 kg/cm^2 と大幅に高くなっており、その圧力以下とする必要があるが、通常、サーベイメータとして生じる衝撃圧に耐えることが期待され、その試験を実施した。

衝撃圧力は力のみならず、時間との関係となり、窓面

へ与える力も条件で大幅に異なり、限定しにくい。そこで通常、使用中に生じるであろうと予想され、かつ、試験条件が一定にできる落下試験を実施した。

この落下試験は通常の衝撃試験とは異なり、窓面へ衝撃圧を与えることが目的である。そのため、強化後の窓(検出部に装着した状態)面をゴムマット上へ面着状態で落下させ、その間の空気を圧縮し、その衝撃圧による破断を調べることにした。

その結果は既述したごとく、各落下高さについて、いずれも破断はなかった。一方、被測定面から窓面を急激に引き離し、加圧と逆に減圧状態とする場合もあるが、試験条件の設定が困難であることから省略し、落下試験で代表した。これらは通常の使用において、窓膜の破断に対し特別な配慮を不要とし、かつ、窓の強化が十分であることを実証している。

2. 窓の強化前後の特性試験

窓の強化に成功する一方、プラトー特性、検出効率の変化が予想されることから、試作カウンタに強化前後の窓をそれぞれ取り付け、諸特性試験を行い、その結果を示す Table 2 を基に次の検討を行った。

2.1 プラトー特性

強化前に対し、強化後のプラトー長さは 50 V 短く 250 V 、プラトー傾斜は 1% 高く、 $6\%/100\text{ V}$ である。これは窓面を陰極とするため、強化前では膜面に金蒸着層を設けていたものを、強化後では格子型フレームを陰極とし、膜面の金蒸着を省略したことによるものである。すなわち、格子型フレームの 80% 開口部の膜部が絶縁面として、カウンタ有感部に露出し、電場を弱めることになり、プラトー開始電圧を高めることになった。

一方、プラトー終端電圧はカウンタ内の電場の強い部分で定まるため、絶縁面の影響が小さく、終端電圧は変わらない。したがって、プラトー長さはプラトー開始電圧の上昇分だけ短くなり、プラトー傾斜もプラトー長さが短くなるのに逆比例して大きくなった。

これらにともない使用電圧を高くするのが妥当であるが、 $2,000\text{ V}$ を維持した。この電圧はプラトー開始電圧よりまだ約 50 V 高く、実用上支障とならない。

使用電圧での計数値は強化前 $(1.10 \pm 0.01) \times 10^4\text{ cpm}$ 強化後 $(1.18 \pm 0.01) \times 10^4\text{ cpm}$ であり、後述の検出効率とも関連するが、強化後のものがむしろ 7% 程度高くなっている。

以上より、窓の強化を行っても測定に支障となる特性の大幅な変化は認められなかった。

2.2 検出効率 (トリチウム面線源測定)

検出効率 η (窓面と既述線源間距離 1 mm) は一般に

次式より求められる。

$$\eta(\%) = \frac{C \times 100}{SD \times 60} \quad (6)$$

C : 計数率 (cpm)

S : 窓面積 (cm^2)

D : トリチウム面線源の崩壊面密度 (dpm/cm^2)

検出効率は(6)式に計数率 C としてTable 2の計数値を代入することにより、強化前 (1.05 ± 0.06)% 強化後 (1.12 ± 0.06)% がそれぞれ得られる。これより強化後の効率は7% 強化前より高くなっている。これは金蒸着層の厚さ $0.03 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の吸収がないことによるもので、その吸収分は測定値を25% 向上する。

しかし、強化後では格子型フレームを2枚使用するため、その開口部を完全に一致させることはむずかしく、ずれを生じる。そこで完全に不一致の場合は約18% 格子型フレームでトリチウム β 線がしゃ断される。しかし、この場合でも金蒸着層がないことから、数%の効率の向上が見込まれる。

これらより、格子型フレームを取り付けたにもかかわらず、むしろトリチウム β 線の検出効率が向上することから、強化策が有効であることが認められる。

V 結 論

格子型フレーム法による放射線入射窓の強化について計算解析を行い、その結果を基にカウンタを試作し、近似計算が適切であったことを実証した。このカウンタはトリチウムのような低エネルギー β 線核種の表面密度測定を目標とした。窓の厚さは $0.15 \text{ mg}/\text{cm}^2$ のアルキルベンゼン系の高分子超薄膜であるにもかかわらず、1 mm

間隔の格子型フレームを適用したことにより、強化率は約66倍向上し、強化後の膜の破断圧力は大気圧において2/3気圧の加減圧に耐えることが確認されている。また、落下試験を行い、通常使用時における衝撃圧に十分耐えることが実証された。

一方、窓の強化にともないプラトー特性、検出効率の変化を実測し、測定に影響ない程度であることを確認した。また、検出効率については金蒸着層での吸収がなくなった等の理由により強化後のものがむしろ高くなっていることも測定結果から得られた。

これらより本法は窓の強化に有効であり、かつ、放射線測定にほとんど影響を与えないことから、本法は、薄窓の強化に広く応用されてもよいものと考えられる。

本研究の遂行にあたり、指摘や助言をいただいた放射線医学総合研究所 樫田義彦先生、富山大学トリチウム科学センター 渡辺国昭教授に感謝の意を表します。また、本稿作成にあたり、指導いただいた大阪大学産業科学研究所 川西政治教授に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) C.M. LEADERER and V.S. SHIRLEY; "Table of Isotopes," 7th ed. (1977), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 2) F. MOHLING; "Statistical Mechanics" (1982), John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 3) M. MURAMATSU, N. TOKUNAGA and A. KOYANO; *Nucl. Instrum. Methods*, **52**, 148 (1967).