

Co-60, 10 kc ケーブの窓の  
シャヘイ用ガラスの性質について

研究報告No. 5

1959年10月

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

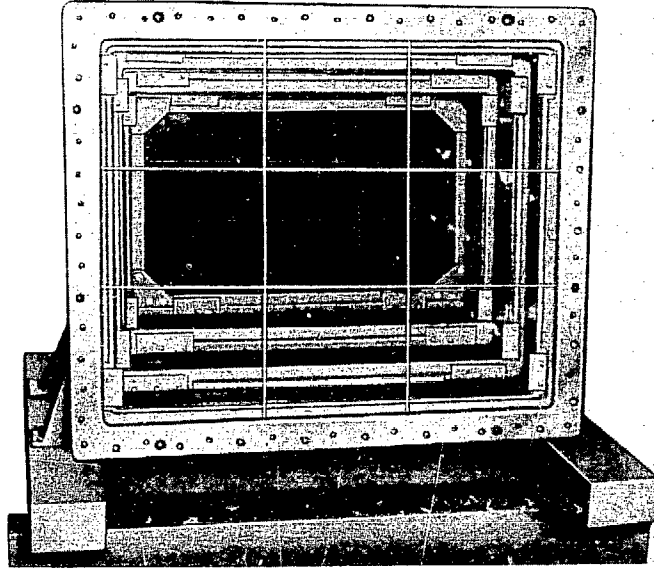


Photo 1. Section of visual field

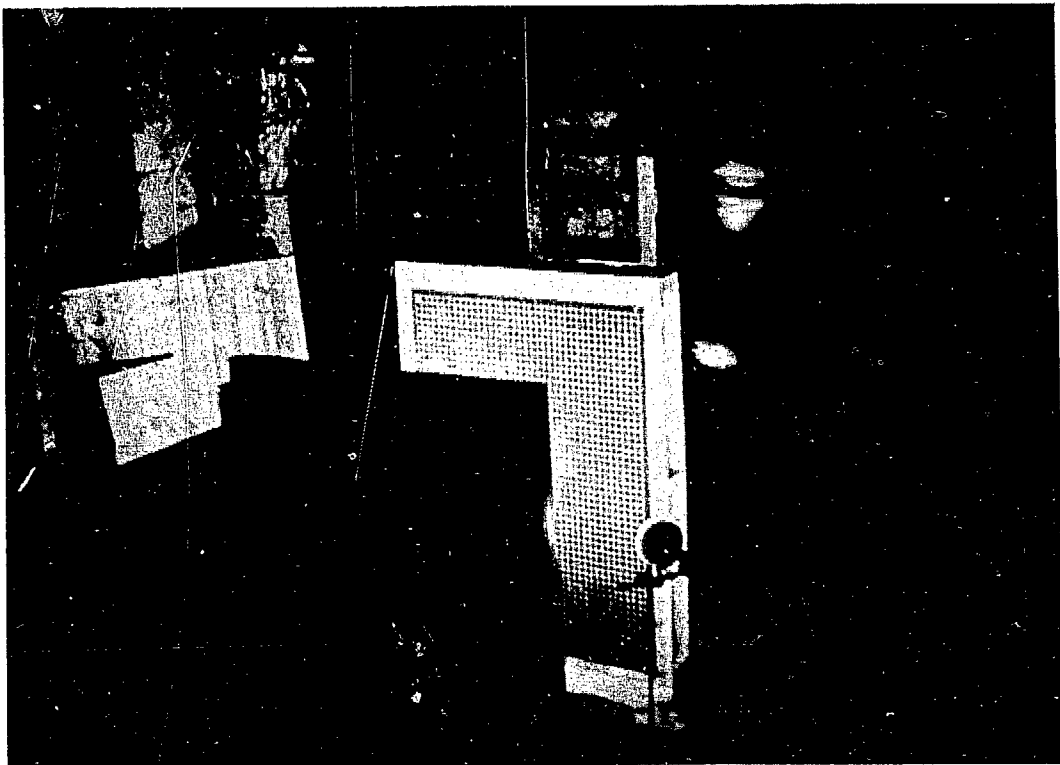


Photo 2. Setting of chart plate

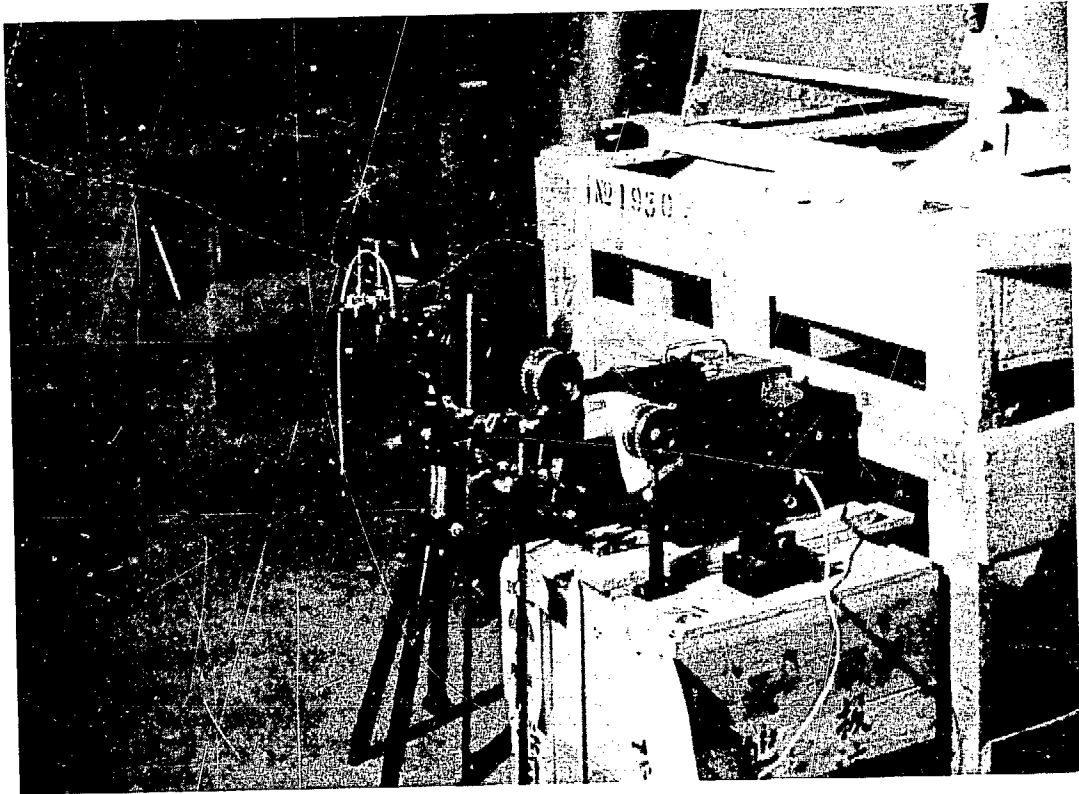


Photo 3. Setting of stress check

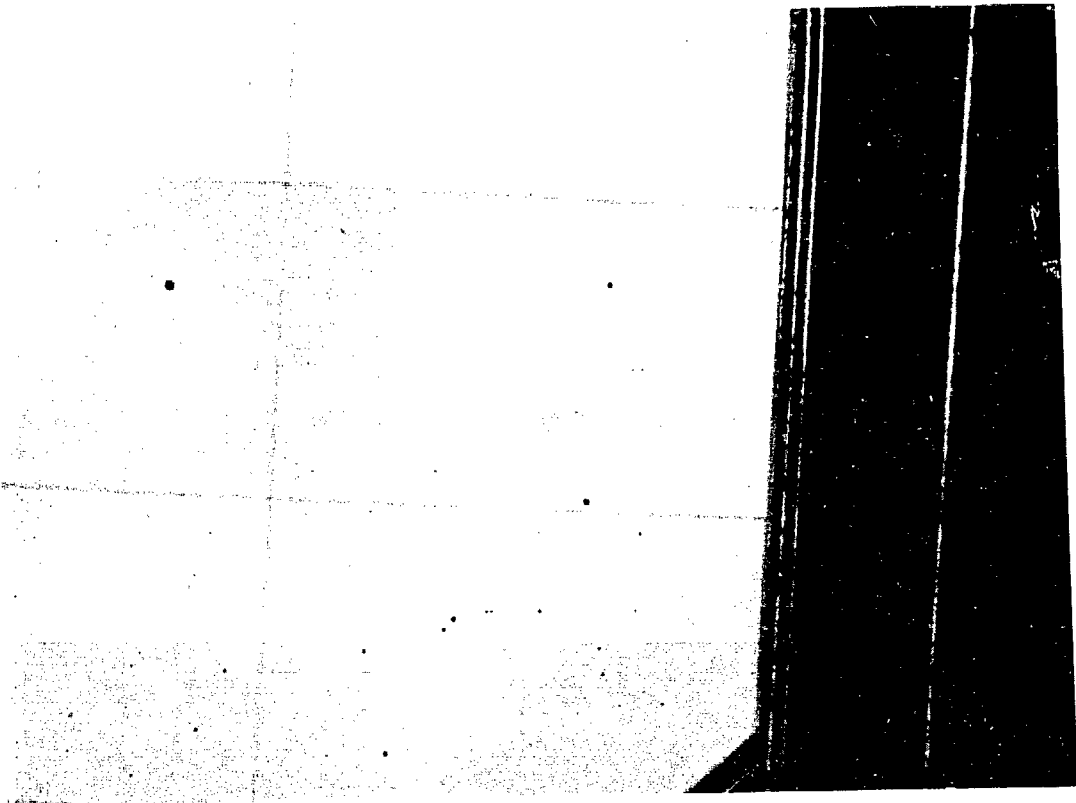


Photo 4. Bubles distributions

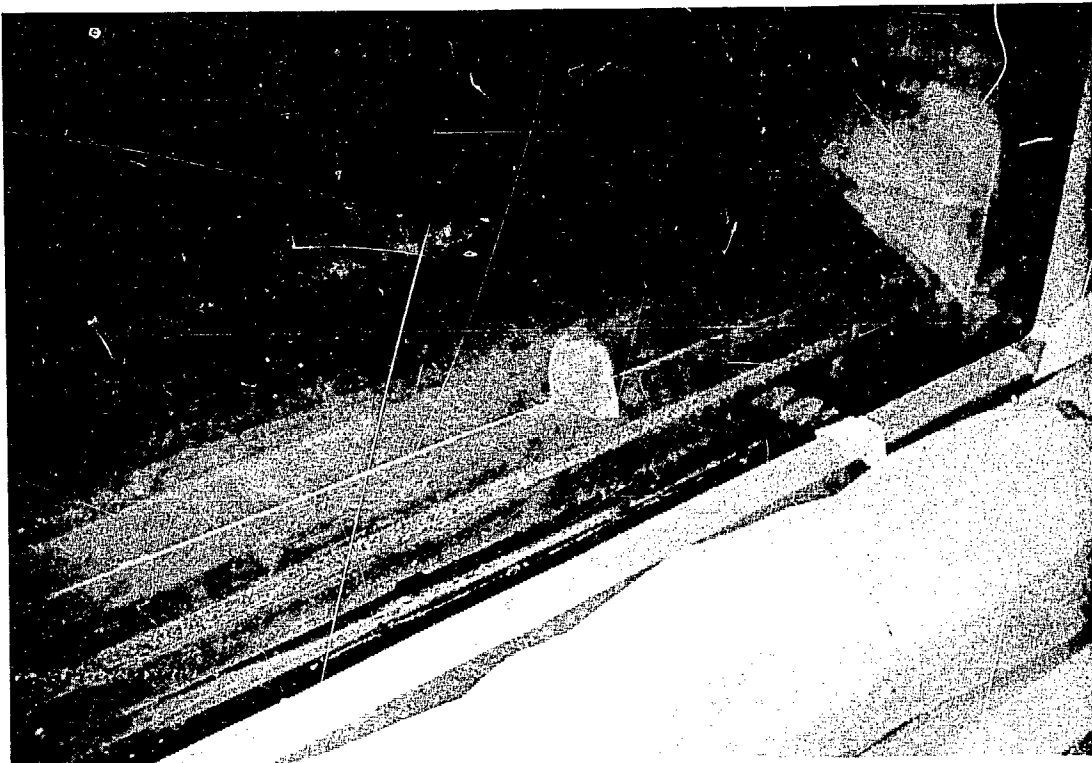


Photo 5. Portion of scratch.

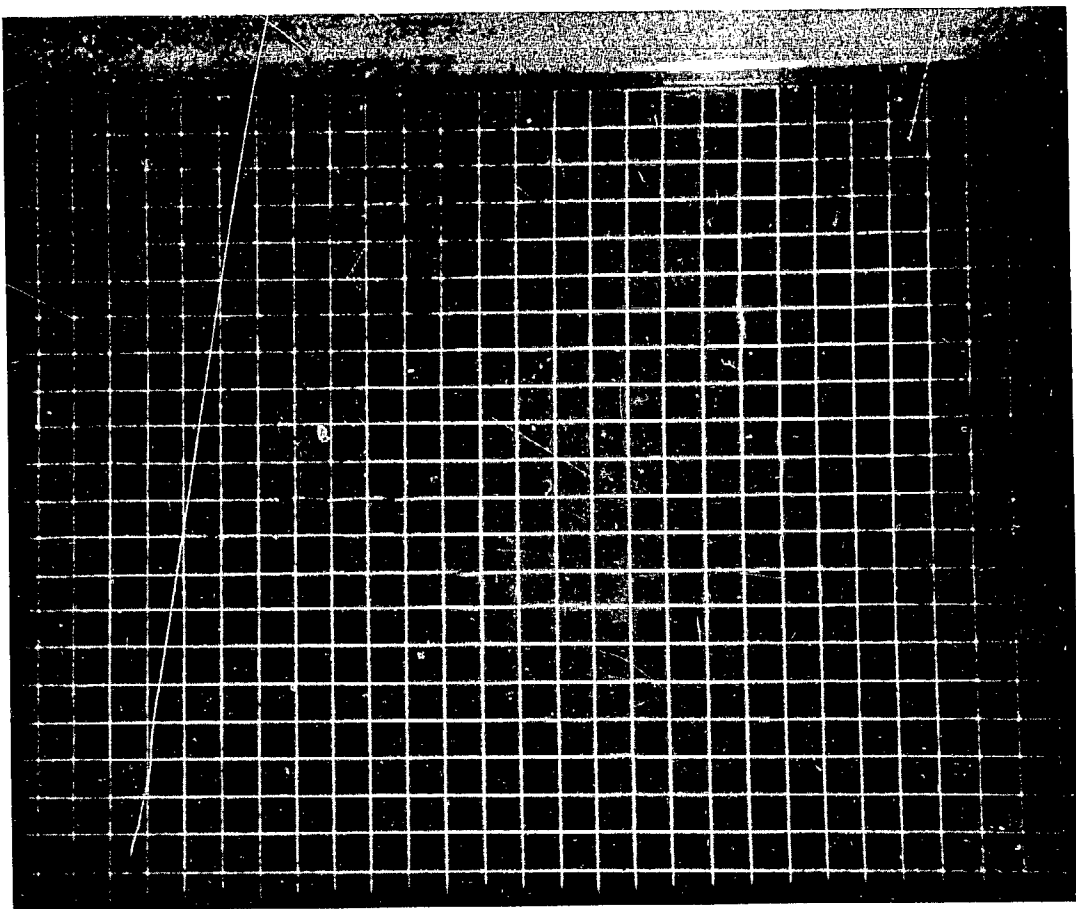


Photo 6. Image change by striae

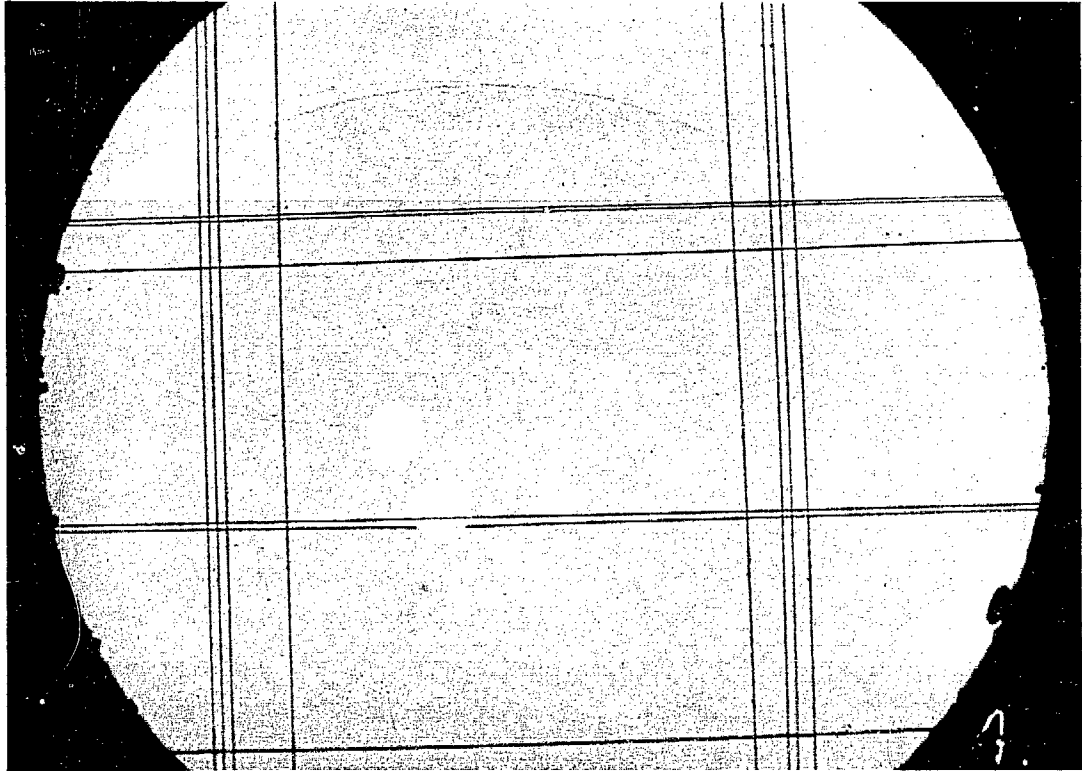


Photo. 7. Striae in Corning Co. shielding window glasses.



Photo. 8. Striae in Penberthy Co. shielding window glasses.



Photo 9. Striae in Nippon Kogaku Co. shielding window glasses.

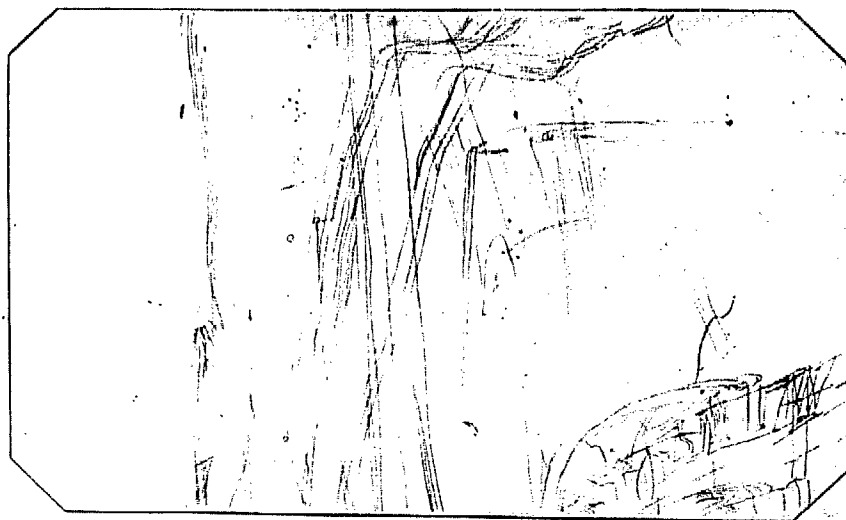


Fig 7. Sketch of striae in Nippon Kogaku Co. shielding window



Fig. 8. Sketch of striae in Penberthy Co. shielding window

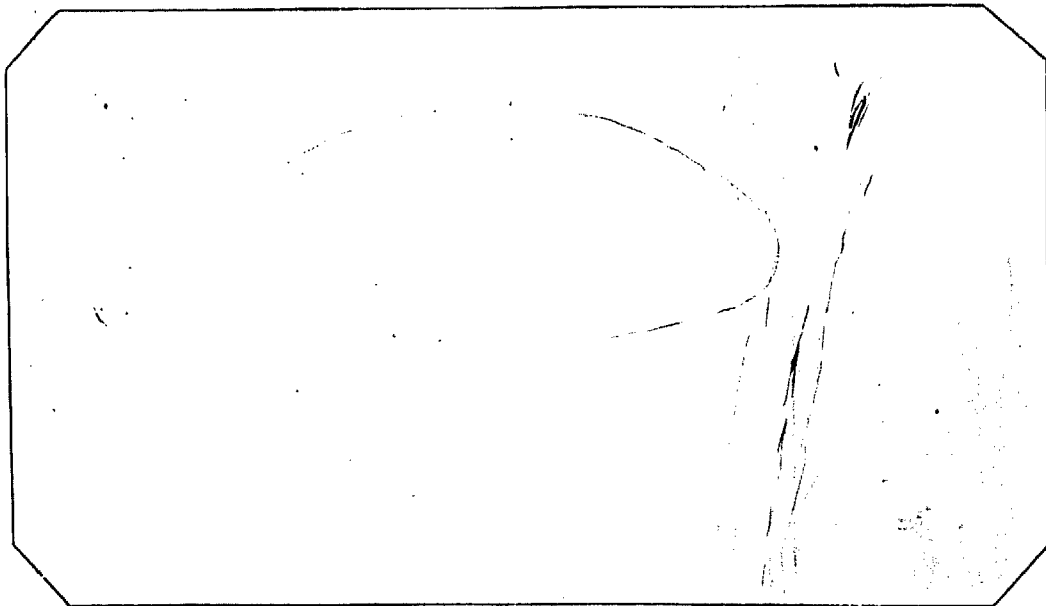


Fig. 9. Sketch of striae in Corning Co. shielding window

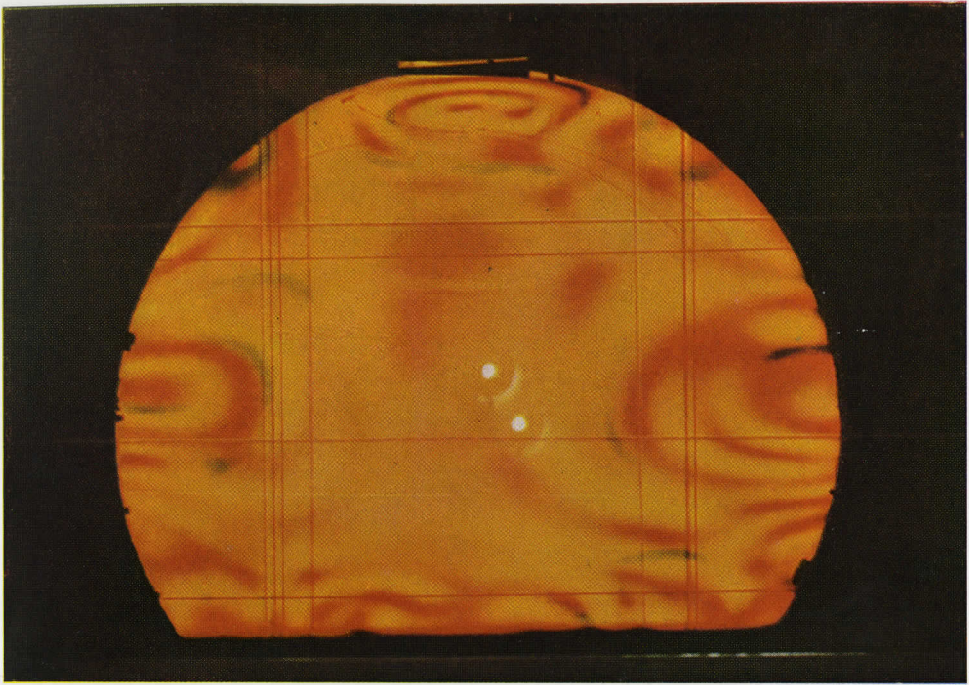


Photo 10. Stress distribution in Corning Co. shielding window glasses.

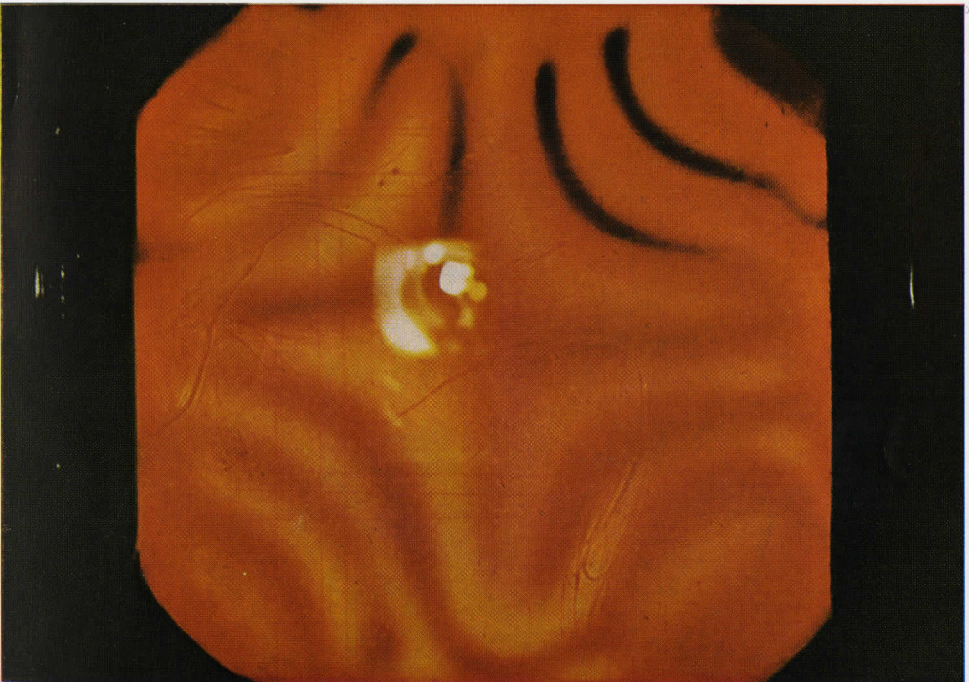


Photo 11. Stress distribution in Penberthy Co. shielding window glasses.



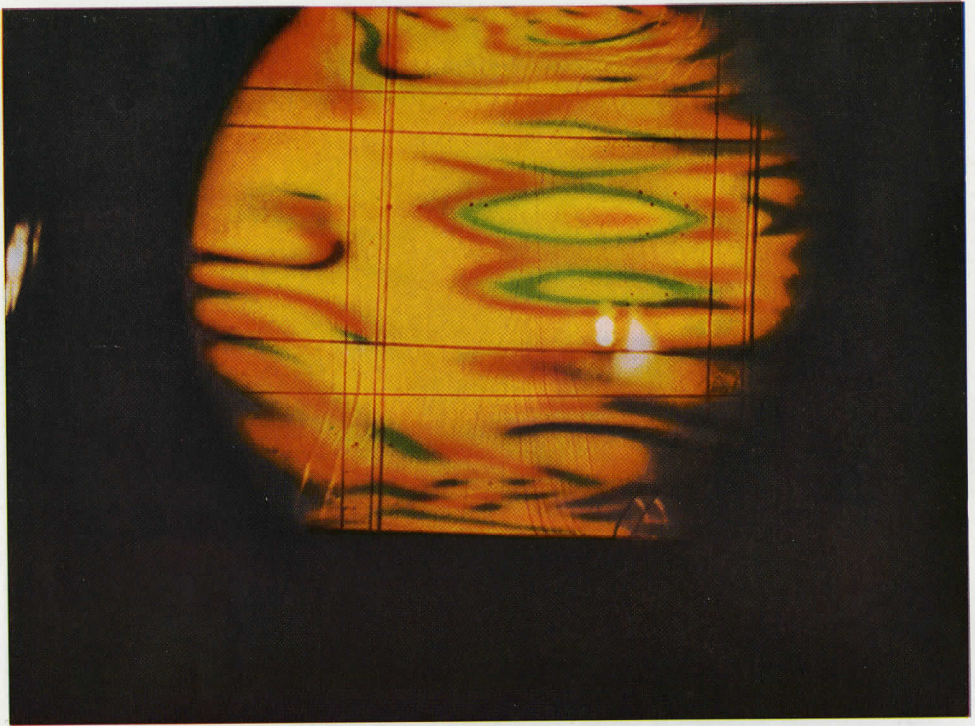


Photo 12. Stress distribution in Nippon Kogaku Co. Shielding window glasses.



Photo 13. Absorption of light and array of spot image.

# Co-60, 10 kc ケーブの窓のシャヘイ用 ガラスの性質について

## 要 旨

コバルト照射室の 10 kc ケーブには 3 箇のシャヘイ窓をとりつけた。このうち 2 箇は米国のコーニング社とペンバーシー社より購入したもので、残りの 1 箇は日本光学工業株式会社ではじめて国産化したものである。ホットケーブ用のシャヘイ窓は大量のラジオアイソトープを取扱うために案出されたもので、実用化されてから日も浅く、まだその性質についてのくわしい研究がなされていない。この種のガラス窓は放射線を完全にシャヘイし、かつ放射線によって着色することのないような安定ガラスでなければならぬので、密度 3~4 と密度 6 くらいの 2 種の鉛ガラスからなり、前者には放射線による着色を防止するため少量の酸化セリウムを入れてある。窓の厚さは約 1 m あり、厚さ数十 cm のガラス板数枚から構成されている。

この報告はシャヘイ窓ガラスの光学的性質と、その性質に影響をおよぼす諸因子、すなわちガラス窓の全透過率や、アワ、石、脈理、ひずみなどの実験の結果を報告する。またシャヘイ窓の放射線に対する着色の問題については別に報告する。

日本原子力研究所放射線応用部

団 野 皓 文 山 本 格 治\*  
山 口 一 郎 河 原 崎 雄 紀

## Optical Properties of the Shielding Windows of Co-60 Gamma Radiation Facility

### Abstract

The shielding window is constructed from several layers of glass with various characters. For the shielding of radiation, shielding efficiency of the window must be equivalent to the concrete wall of a hot cave. From an optical view point, the glass should not have any optical defect to have a good observations and the image should be sufficiently free from any distortion to perception of fine details with a high resolution. Consequently, the components of the glass of a shielding window should have the following qualities: radiation shielding, no color change by irradiation, no clouding or jogging, a high transmittance, and a good visual quality. With the qualities described above three shielding windows manufactured by Corning Glass Works, Penberthy Instrument Co. and Nippon Kogaku Co. were examined.

Bubbles, stones, and scratches were found in all the three windows in considerable quantities, and striae were found in the two windows, except the one made by Corning Glass Works. These inclusions proved to be very harmful to visual observation quality. Transmittances of windows measured for D-line are about 25% for the Nippon Kogaku's, 23% for the Corning's, and 14% for the Penberthy's. Measurements on the attenuation of radiation intensity through the window and color change by the irradiation of cobalt-60 gamma rays will be reported in the next paper.

Apr. 1959

AKIBUMI DANNO, KAKUJI YAMAMOTO,  
ICHIRO YAMAGUCHI, YUKI KAWARAZAKI.

Japan Atomic Energy Research Institute, Division of Radiation Applications

\* 嘱託、静岡大学文理学部助教授

# Co-60, 10kc ケーブの窓のシャヘイ用ガラスの性質について

## 目 次

1. まえがき.....	1	3.4 透過度.....	6
2. 窓の構成.....	1	3.5 その他の検査.....	7
3. 実験方法.....	4	4. 測定結果.....	7
3.1 アワおよび石などの異物.....	4	4.1 アワ, 石およびその他.....	7
3.2 脈理.....	5	4.2 脈理.....	9
3.2.1 像の変形の写真撮影.....	5	4.3 ひずみ応力.....	9
3.2.2 Schlieren 法.....	5	4.4 透過度.....	10
3.2.3 間接法.....	5	4.5 その他.....	10
3.3 ひずみ検査.....	6	5. 結論.....	10

## CONTENTS

1. INTRODUCTION .....	1	3.4 TRANSPARENCY .....	6
2. CONSTRUCTION OF WINDOWS .....	1	3.5 OTHER INSPECTIONS .....	7
3. INSPECTION METHOD .....	4	4. RESULT OF INSPECTION .....	7
3.1 BUBLE AND STONE .....	4	4.1 BUBLE AND STONE .....	7
3.2 STRIA .....	5	4.2 STRIA .....	9
3.2.1 PHOTOGRAPHING OF IMAGE DISTORTION .....	5	4.3 STRAIN .....	9
3.2.2 SCHLIEREN METHOD .....	5	4.4 TRANSPARENCY .....	10
3.2.3 PROJECTING METHOD .....	5	4.5 OTHERS .....	10
3.3 STRAIN .....	6	5. CONCLUDING REMARKS .....	10

# 1. ま え が き

日本原子力研究所は1958年8月、10 kcのコバルト-60を線源とするコバルト-60照射室を建設した。この線源を格納、使用するためのケーブルに取りつけたシャヘイ窓のガラスは、放射線を完全にさえぎり、かつ放射線を受けても着色しないことが必要である。さらにこの窓を通して、ケーブル内でおこなう実験操作などを見るため、窓ガラスの光学的性質も問題になる。したがってシャヘイ窓は、つぎの諸種の条件を満足しなければならない。

- i 放射線を完全にさえぎること
- ii 放射線を受けても着色などの変化がないこと
- iii ガラスの表面が曇らないこと
- iv 光の透過率の良好なこと

## v Visual observation quality がよいこと

ここに visual observation quality とは、窓を通して見るときに、像のひずみや、分解能などの性質を意味するものである。これらの条件のうち放射線のシャヘイ度、着色度および曇りなどについては窓ガラスの個々の性質の調査や、長時間の照射のちでないと検討できないので、今回は主として光学的性質と、その性質に影響をおよぼす諸因子、すなわちシャヘイ窓ガラスの全透過率や、アワ、石、脈理、ひずみや折込みなどについて試験した結果を報告する。実験に供したシャヘイ窓は Corning Glass Works 製の油充テン型シャヘイ窓と、日本光学工業社製と Penberthy Instruction Co. の空気充テン型シャヘイ窓である。

# 2. 窓 の 構 成

試験したシャヘイ窓は各製作会社によってガラスの種類、枚数、寸法およびその物理的性質や形式がこと

なっている。その構造は第1、2および3図に、それらのガラスの枚数、寸法と物理的諸性質は第1、2お

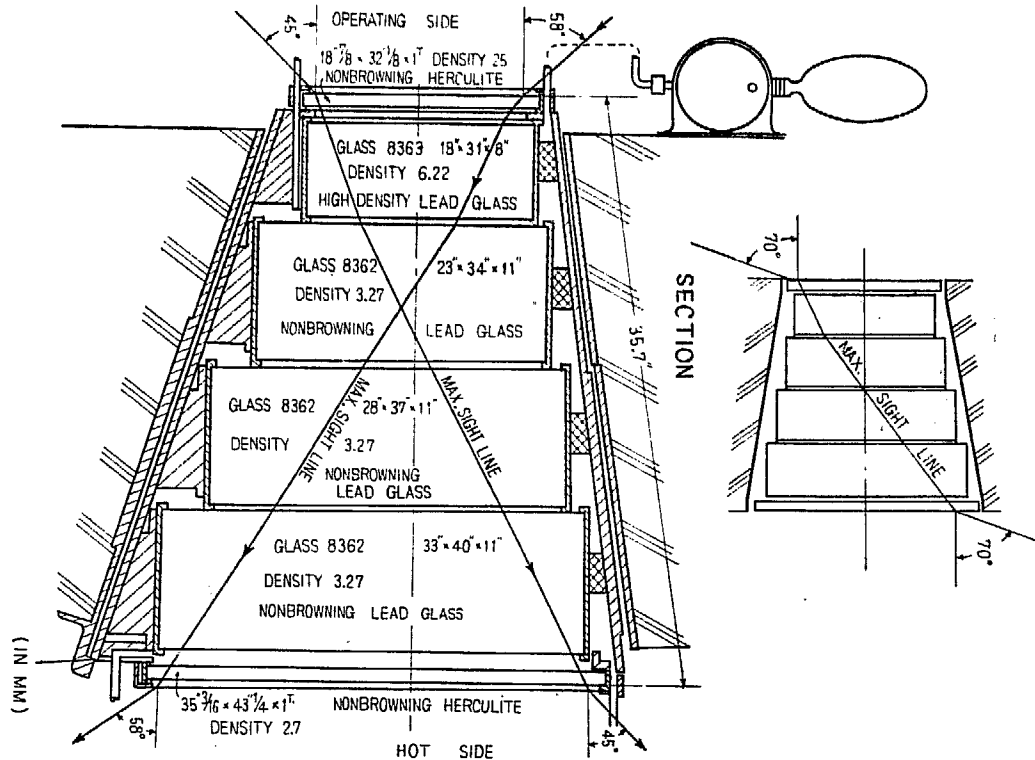


Fig. 1 Shielding window (Corning Co.)

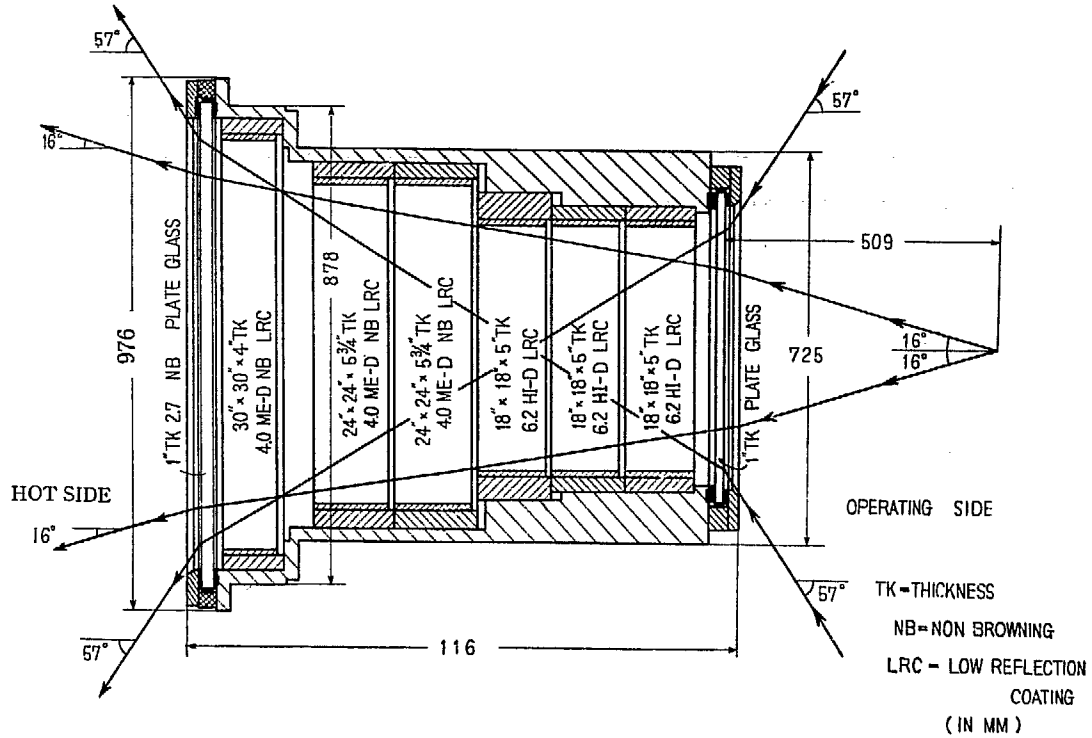


Fig. 2 Shielding window (Penberthy Co.)

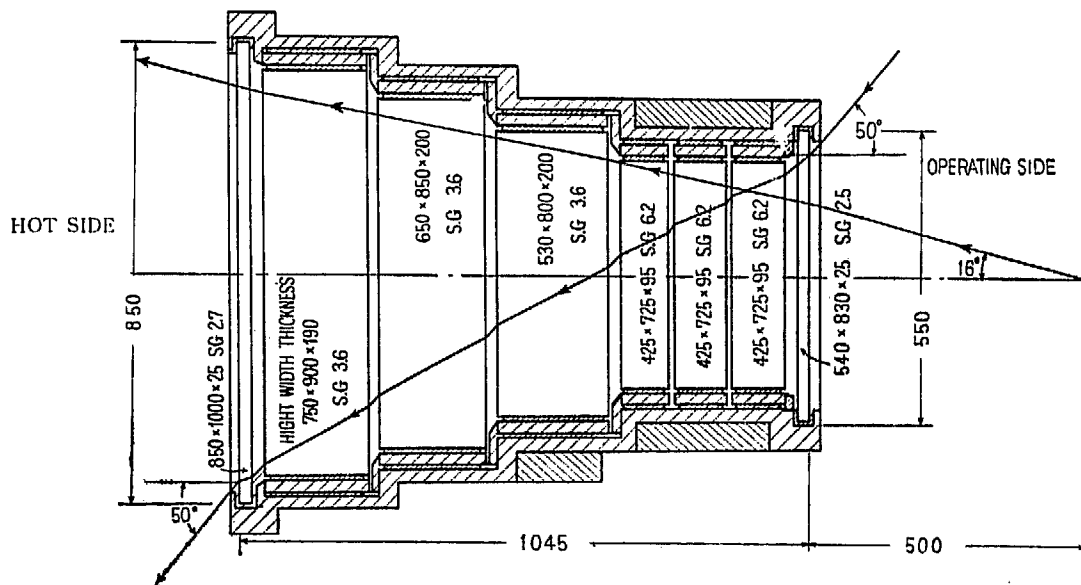


Fig. 3 Shielding window (Nippon Kogaku Co.)

よび 3 表に示した。なお、表中のガラス番号は、ホットサイドから番号をつけた。以下、つねにホットサイドからガラス番号を呼ぶことにする。

一般にシャヘイ窓は種々の性質の数枚のガラス層からなっており、 $i$  番目のガラス層の密度を  $\rho_i$ 、厚さを  $l_i$  とすれば、シャヘイ窓がコンクリート壁と同程度のシャヘイ効果をあげられるためには、つぎの式を満足しな

ければならない。

$$\sum \rho_i l_i \geq \rho_0 l_0$$

ここに  $\rho_0$ 、 $l_0$  は、それぞれコンクリートの密度と、壁の厚さである。コバルト-60 の 10 kc 用ケーブのコンクリート壁は、密度 3.8、厚さ 100 cm としたので、 $\sum \rho_i l_i = 400$  とした。第 4 表は上記 3 社の製品について、第 1, 2 および 3 表より、これらパラメーターを

TABLE 1. Physical properties and dimensions of structural component glasses of Corning's shielding window\*

ガラス番号	ガラス種類	比重	屈折率	透過率 (%)	反射率 (%)	高さ (cm)	幅 (cm)	厚さ (cm)	面積 (cm <sup>2</sup> )	重量 (kg)
1	N. B. Herculite 8365	2.7	1.52	99.96	4.3	87.15	97.16	2.54	8467.49	58.07
2	N.B. Lead Glass 8362	3.27	1.594	99.96	5.2	76.2	91.44	27.92	6967.73	636.14
3	"	"	"	"	"	66.04	83.36	"	5703.21	520.69
4	"	"	"	"	"	55.89	81.28	"	4542.74	414.74
5	High Density Lead Glass 8363	6.22	1.98	99.86	10.8(5.0)**	45.7	76.2	20.32	3482.34	440.13
6	N. B. Herculite 8365	2.5	1.52	99.96	4.3	52.39	81.92	2.54	4291.79	272.53

\* This window is an oil-filled type and index of oil is  $n_D=1.48$

\*\* With special surface treatment.

TABLE 2. Physical properties and dimensions of structural component glasses of Penberthy's shielding window

ガラス番号	ガラス種類	比重	屈折率	透過率 (%)	反射率 (%)	高さ (cm)	幅 (cm)	厚さ (cm)	面積 (cm <sup>2</sup> )	重量 (kg)
1	N. B.	2.7	1.52	95.7	4.3	87.63	87.63	2.54	7677.40	52.65
2	Me D, N. B.	4.0	1.66	98.4	6.2	76.2	76.2	10.16	5806.44	235.97
3	"	"	"	"	"	60.96	60.96	14.61	3716.12	217.17
4	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
5	Hi D,	6.2	1.97	89.3(98.4)*	10.7	45.72	45.72	12.7	2090.32	164.59
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
8	Cover Glass	2.7	1.52	95.7	4.3	57.79	57.79	2.54	3338.70	22.90

\* With low-reflecting coating.

TABLE 3. Physical properties and dimensions of structural component glasses of Nippon Kogaku's shielding window

ガラス番号	ガラス種類	比重	屈折率	透過率 (%)	反射率 (%)	高さ (cm)	幅 (cm)	厚さ (cm)	面積 (cm <sup>2</sup> )	重量 (kg)
1	S-N	2.7	1.53	99.0	5.0	85	100	2.5	8500	57.5
2	F3b-N	3.6	1.63	98.0	2.0	75	90	19.0	6750	462.
3	"	"	"	"	"	65	85	20.0	5525	398.
4	"	"	"	"	"	53	80	"	4240	305.
5	SFS-R	6.2	1.97	99.0	2.0	42.5	72.5	9.5	3081	182.
6	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
7	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
8	K	2.5	1.52	99.9	5.0	55	85	2.5	4675	29.3

求めて整理したものである。

これらの窓ガラスは、いずれも屈折率が高いので、透過度を上げるために、Corning 社製窓は油をガラス層間に充テンしており、また日本光学社製と Pen-

berthy 社製の窓はガラス表面にコーティングを施し、そのすき間には乾燥空気が充テンしてある。

なお、各ガラス窓の視界は第5表のとおりである。

TABLE 4. Construction of three shielding windows

Assembly of Glass	Supplier	Corning Glass Works	Penberthy Instru. Co.	Nippon Kogaku Co.
		Dens., Thick., Layer	Dens., Thick., Layer	Dens., Thick., Layer
Hot-side cover		(2.7)* × 2.5 × 1	(2.7)* × 2.5 × 1	(2.7)* × 2.5 × 1
Medium density		(3.3)* × 27.9 × 3	(4.0)* × 10.2 × 1 (4.0)* × 14.6 × 2	(3.6)* × 19.0 × 1 (3.6)* × 20.0 × 2
High density		(6.2) × 20.3 × 1	(6.2) × 12.7 × 3	(6.2) × 9.5 × 3
Cold-side cover		(2.5) × 2.5 × 1	(2.7) × 2.5 × 1	(2.5) × 2.5 × 1
$\Sigma(\text{Dens.}) \times (\text{Thick.})$		415.5	409.5	402.0
Size:				
Cold-side		45.7 × 78.7	45.7 × 45.7	42.5 × 72.5
Hot-side		83.8 × 101.6	76.2 × 76.2	65.0 × 90.0
Thickness		109.2	82.6	89.2
Spaces are filled		by oil	by dry air	by dry air

\* non-browning glass

TABLE 5. Viewing angles in each shielding window

	Corning's Window	Penberthy's Window	Nippon Kogaku's Window
中心軸上	上 21°16' 下 32°30' 左右 29°30'	上下各 16° 左右各 16°	上下各 16°45' 左右各 22°5'
最大偏軸視角	上 58°, 下 45° 左右 70°	上下各 57° 左右	上下各 52°20' 左右各 64°20'

### 3. 実験方法

#### 3.1. アワおよび石などの異物

シャヘイ窓は、たとえば Corning 社製のものについて述べれば、ホットサイドは 33 インチ × 40 インチ、コールドサイドは 18 $\frac{1}{2}$  インチ × 32 $\frac{1}{2}$  インチの大きさで、奥行は 40 インチもあるので、この体積中に含まれるアワおよび石の数を正確に測定することは非常に困難であり、また誤差が多くなる。そこで、できるだけ正確に、容易に測定しうるために窓面積を写真1のように糸を張って9等分し、その各部分についてコールドサイドから見て第4図のように記名して、その各部分にあるアワ、石の数、最大径とその数を肉眼で測定した。このようにすれば、窓の中央部が他の周辺部よりも特に良好であるかどうかを比較するのに便利である。

つぎにこれらのアワ、および石などがシャヘイ窓の

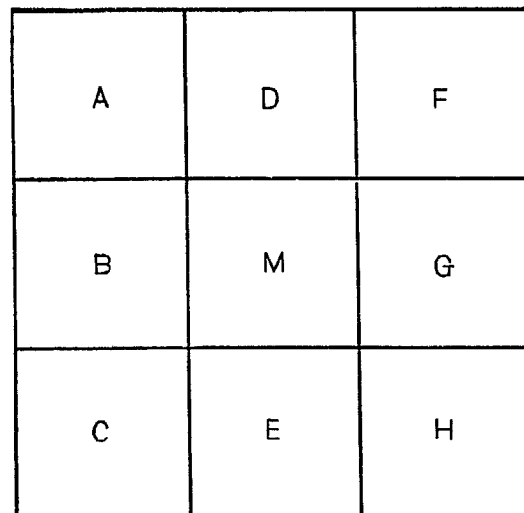


Fig. 4 Diagram of sections and their notation of visual field

構成ガラスのいずれのガラスに含まれているかを検査した。これは眼の位置をガラス面から一定の距離で上下左右に移動して、さきに区分した糸からの移動量(パララックス)の大小によって、その異物の存在位置を確定する。(この方法を以下パララックス法と呼ぶ)

### 3.2. 脈理

アワおよび石などの異物のほかに visual observation quality に影響を与えるものに脈理がある。この脈理は光学ガラスでは像をゆがめる大きな因子であるから、特に注意して極力さけているものである。しかしシャヘイ窓のガラスについては光学ガラスほどやかましくなく、平行脈理などはある程度許容されている。ただしこの窓ガラスを通して内部の写真をとったり、実験操作するときには<sup>4)</sup>のゆがみや切断がないことが必要であるので、この脈理がどの程度まで許されるかはその目的によってことなるから一概にはきめられない。この脈理の検査には種々の方法<sup>5)</sup>があるが、そのうち設備の関係から、つぎのような方法をおこなった。

- i. 像の変形の写真撮影
- ii. Schlieren 法
- iii. 間接法(投影法)

つぎにこれらの方法について述べる。

**3.2.1. 像の変形の写真撮影** この方法は被写体をホットサイドにおき、それをコールドサイドからシャヘイ窓を通して撮影し、このときの像の変形の程度によって visual observation quality の良否を判定するものである。物体としては撮影後結果を検討するのに簡便であることが望ましいので、まず同一平面上に同一図形、たとえばレンズの検査規格の test pattern<sup>6)</sup>を一定の順序にしたがって分布させた chart plate を窓ガラス面に平行に、面から 60 cm 離れたところに立て、コールドサイドから写真撮影した。しかしこの方法は plate 全面に test pattern をとり付けるのが容易でないばかりか、pattern の図形が同一大きさでないので検討が不便であり、視野全体についての状況が見られない欠点がある。

この欠点を補う方法として chart plate として用いたものは、黒地の紙に直線を縦、横に引いた plate である。実際に用いたものは黒のラシヤ紙に白線で書

いた 2 cm の方眼紙である。この実験の状況は写真 2 に示されている。このようにして撮影した写真を調べると、脈理のところを通過してきた直線の像には、ぼけ、まがり、切断などが起り、その程度によって脈理の度合を知ることができる。

**3.2.2. Schlieren 法** 以上の方法は主として visual observation quality の立場から取扱ったものであるが、Schlieren 法は屈折率のちがいによる光路差を利用したものである。この測定方法は第 5 図に示すように、ホットサイドに Schlieren mirror (オウ面鏡)、

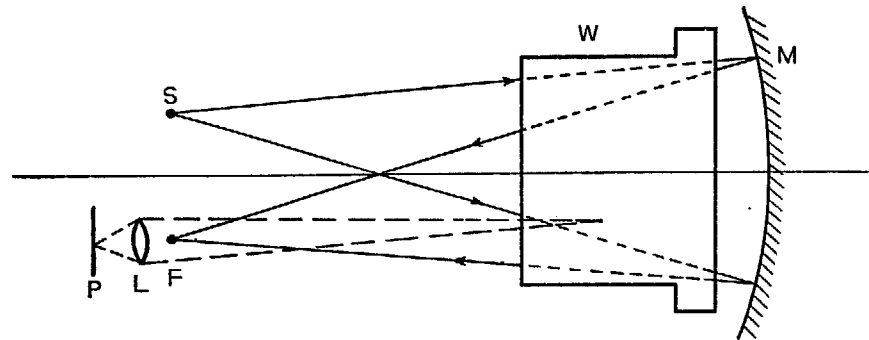


Fig. 5 Diagram of Schlieren method

S: Point source      L: Camera lens      P: Plate  
M: Schlieren mirror      F: Focus      W: Shielding window

コールドサイドに点光源をおいて、点光源からの光束をシャヘイ窓ガラスを通して Schlieren mirror で反射させ、ふたたび窓ガラスを通過してきた像を撮影または肉眼で視察し、脈理を検査する。実際に用いた光源は zircon ランプで、鏡は直径 65 cm、焦点距離 4 m である。

さらに脈理が窓の構成ガラスのいずれに含まれているかを調査するために、つぎのような方法をとった。すなわちカメラの位置を固定したままで、焦点距離を細かく変えて、それぞれの焦点位置に対する脈理の写真から、そのピントのずれの状態を検査する、いわゆる断層写真法によって、脈理の存在位置を決定できる。

**3.2.3. 間接法(投影法)** 窓ガラスの一方の側に点光源をおき、他方にすりガラス板、またはトレーシングペーパーをおいて脈理の影像を求める方法である。この場合、すりガラス板と反対側に点光源をおく。脈理により光束が分散した箇所は暗くなるので、すりガラス板上の像を写真にとるか、トレースすることによって脈理の様子を調べることができる。なお、この方法によっても、脈理がシャヘイ窓のどの構成ガラスに含まれているかを調べることができる。すなわち、点光源の位置をガラス面に平行な平面内で上下左右に移



動した時の影像の移動量によって求める。この操作を光源の位置を変えておこない、ホットサイドの時とコールドサイドの時とで移動量を測定し、その両者における移動量を比較して、その位置を決定できる。

以上3つの方法を適用して、脈理の形状、位置、大

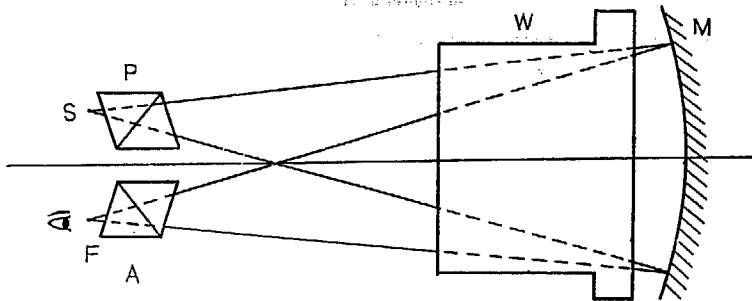


Fig. 6 Diagram of stress check

P: Polarizer S: point Source A: Analyser  
W: Shielding Window M: Shlieren mirror

きさなどを定性的に求め、その像への影響の度合を知ることができる。

### 3. 3. ひずみ検査<sup>3)</sup>

ガラスにひずみがあると像が変形するだけでなく、外部の衝撃や急激な温度変化によって微小な割れ目が成長して、結局破損することになる。それゆえ、このひずみの存在の度合は脈理と同様にガラスにとっては重要な問題である。ひずみの検査法は第6図に示すように、点光源からの光束を偏光子(Polarizer)を通して偏光させ、それがシャヘイ窓ガラスを通過するときガラスのひずみの程度によって偏光面が変化するので、これを検光子(Analyser)を通して見ると視界が種々に着色し、そのひずみの状況がわかる。この装置は写真3に示す。

しかしこの場合に見られるひずみの度合はガラス全部に関するもので、特にシャヘイ窓の両板にある強化ガラスのひずみが強くあらわれる。

### 3. 4. 透過度

以上のような方法で検査した結果が良好であっても、さらに内部の物体がはっきり見えなくては使いものにならない。したがって窓ガラスとして透過度の大きいことが必要となる。この測定法は、点光源と受光器との間隔を一定に保ち、受光器で照度を測定し、その値とその間に窓ガラスを入れたときの測定値とを比較して定める。この場合、光源からの光束は発散するので、窓ガラスを通した時と、通らない時では状態がことなる。すなわち、窓ガラスを通した時は光源が受光器に、より近づいているようになる。この近づき量は

率、厚さをそれぞれ  $n$ ,  $d$  とすれば、近づきの量  $l$  は

$$l = (n-1)d/n \quad (1)$$

である。したがって光源と受光器との距離が  $L$  であっても光源は  $l$  だけ近づくので、 $L' = L - l$  の距離にあることになる。そこで実際の透過率  $T_p$  は実測値

$T_0$  を用いて表わすと

$$T_p = (L'/L)^2 T_0 \quad (2)$$

となる。したがって  $T_0$  を(2)式によって補正したものが実際の透過率  $T_p$  になる。

また透過率は理論的に計算することができる。いま光の強度は空気中では距離の自乗に逆比例し、ガラスの中では指数関数的に減少するものとして、D'ALEMBERT の法則を適用すると、透過率  $T_0$  はつぎの式で与えられる。

$$T_{01} = \frac{\prod_{i=1}^N k_{if} k_{ib}}{\left(a + b + \sum_{i=1}^N d_i + \sum_{i=1}^{N-1} d_i'\right)^2} f(\theta) \quad (3)$$

ただし

$$f(\theta) = \frac{1}{1 - \cos\theta} \int_0^\theta (\cos\theta)^{4N-1} \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{\sin^2\theta}{n_i^2}\right) \times \exp\left\{-\sum_{i=1}^N \frac{\mu_i d_i}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2\theta}}\right\} \left\{\left(a + b + \sum_{i=1}^{N-1} d_i'\right) \tan\theta + \sum_{i=1}^N \frac{d_i \sin\theta}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2\theta}}\right\} \left\{\left(a + b + \sum_{i=1}^N d_i'\right) \sin^2\theta + \sum_{i=1}^N \frac{d_i n_i^2 \cos\theta}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2\theta}}\right\} d\theta \quad (4)$$

ここに

$\prod_{i=1}^N k_{if} k_{ib} = k_{1f} k_{1b} \cdots k_{Nf} \cdot k_{1b} k_{2b} \cdots k_{Nb}$  を示す。他の場合も同様である。また

$k_{if} k_{ib} (i=1, 2, \dots, N)$ ;  $i$  番目のガラスの前面、後面の表面透過率

$\mu_i (i=1, 2, \dots, N)$ ;  $i$  番目のガラスの内部吸収係数

$d_i (i=1, 2, \dots, N)$ ;  $i$  番目のガラスの厚さ

$d_i' (i=1, 2, \dots, N)$ ; ガラス間の  $i$  番目の空気層の厚さ

$n_i (i=1, 2, \dots, N)$ ;  $i$  番目のガラスの屈折率

$a$ ; ガラスの最初の面と光源との距離

$b$ ; ガラスの最後の面と受光器との距離

$\theta$ ; 受光器に入る光束の開きの最大角で受光面の半径を  $R$  とすれば、次式で与えられる。

$$\left\{ a + b + \sum_{i=1}^{N-1} d_i' \right\} \tan \theta + \sum_{i=1}^N \frac{d_i \sin \theta}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta}} = R \dots (5)$$

この計算では入射光が表面で反射するものを省略しているが、各ガラス内で多重反射して透過するものもある。同一種類のガラスの枚数を  $m_i$ 、表面反射率を  $r_i$  として表わせば

$$T_{C2} = \prod_{i=1}^N \frac{(1-r_i^2)r_i^4}{1+(2m_i-1)r_i^2} \quad (6)$$

したがって全体の透過率は (3) と (6) とから

$$T_C = \frac{\prod_{i=1}^N k_{if} k_{ib}}{\left( a + b + \sum_{i=1}^N d_i + \sum_{i=1}^{N-1} d_i' \right)^2} f(\theta) + \prod_{i=1}^N \frac{(1-r_i^2)r_i^4}{1+(2m_i-1)r_i^2} \quad (7)$$

で求められる。しかし実際には (7) 式の最後の項、すなわち (6) 式の値は第 1 項に比較して非常に小さいので、ほとんど無視してよい。

以上はガラスのすき間が空気層である場合、すなわち Penberthy と日本光学社製の窓には適用される。ところが Corning 社製の窓はガラスの間に油が充填されている。

その油の中で光がやはり指数関数的に減少するとすれば、(7) 式のかわりに、つぎの式が導かれる。

$$T_{C1} = \frac{\prod_{i=1}^N k_{if} k_{ib}}{\left( a + b + \sum_{i=1}^N d_i + \sum_{i=1}^{N-1} d_i' \right)^2} \quad (8)$$

ただし

$$F(\theta) = \frac{1}{1 - \cos \theta} \int_0^\theta \cos^2 \theta \prod_{i=1}^N \left( 1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_i^2} \right)^{N-1} \left( 1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_i'^2} \right) \times \exp \left\{ - \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i d_i}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta}} - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mu_i' d_i' n_i'}{\sqrt{n_i'^2 - \sin^2 \theta}} \right\} \times \left\{ (a+b) \tan \theta + \sum_{i=1}^N \frac{d_i \sin \theta}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta}} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{d_i' \sin \theta}{\sqrt{n_i'^2 - \sin^2 \theta}} \right\} \times \left\{ (a+b) \sec^2 \theta + \sum_{i=1}^N \frac{d_i n_i^2 \cos \theta}{\sqrt{n_i^2 - \sin^2 \theta}} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{d_i' n_i'^2 \cos \theta}{\sqrt{n_i'^2 - \sin^2 \theta}} \right\} d\theta \quad (9)$$

上式における記号  $n_i'$ 、 $\mu_i'$  以外はすべて (3)、(4) 式のものと同じである。 $n_i'$ 、 $d_i'$  および  $\mu_i'$  はそれぞれ充テン油の屈折率、油層の厚さおよび吸収係数を示す。この時も多重反射による寄与を考慮すべきであるが、さきに述べた理由により省略して、実際には (8)、(9) 式で十分である。

### 3. 5. その他の検査

ガラスの表面の反射像を利用して光の吸収の度合および面の平行度を調べる方法がある。これには白色光を透過させたときの各ガラスの表面による反射像の色を観察または撮影することにより、明るさ、色の変化および像の並びかたを検査できる。明るさ、色の様子はカラーフィルムに撮影して調べられる。また像の並びかたは完全平行ならば、各構成ガラスの面より反射してできる光源の像が一直線上に並ぶべきものである。この直線からのずれから、面の平行度を求めることができる。

## 4. 測定結果

さきに述べた方法を用いて Corning 社、Penberthy 社および日本光学社製の各種シャヘイ窓について測定した結果を、以下各項目について述べる。

### 4. 1. アワ、石およびその他

筒数および大きさについては前に述べたように肉眼で測定した結果である。第 6 表にあげたものはアワと石とはっきり区別できたものであって、非常に微小な異物までも取上げれば、表の筒数の 20~30% の増加となる。なおアワおよび石によって妨害される全面積と窓面積との面積比、および中央部 M に存在するアワなどの総面積と中央部との面積比は、窓の visual observation quality の 1 つの尺度と考えられる。この値を第 6 表の最後の 2 行に示してある。これらのア

ワなどの状況は写真 4 に示す。

つぎにアワなどが窓ガラスのうちのどの構成ガラスにあるかを調べた。Corning 社製の窓は第 6 表でも明らかなおお、他社の製品と比較して非常に少なく、またその大きさも小さいのみならず、窓の中央部において特にその数、大きさが周辺より少なく、かつ小さいので、この窓については省略した。

Penberthy 社の窓については、バララックス法によって判定した結果から、第 2、第 3 番目のガラス、すなわち medium density の構成ガラスに、アワ、石などの異物がはなはだ多いことが認められた。

日本光学社製の窓には、相当な数と大きさの石などの異物が含まれている。これについては第 2、第 3、

TABLE 6. Distribution of bubbles and stones etc. in each window

会社名 種類 区分	Corning Co.						Penberthy Co.						Nippon Kogaku					
	ア			ワ			ア			ワ			ア			ワ		
	筒数	最大径 (mm)	最大径 を有する 筒数	筒数	最大径 (mm)	最大径 を有する 筒数	筒数	最大径 (mm)	最大径 を有する 筒数	筒数	最大径 (mm)	最大径 を有する 筒数	筒数	最大径 (mm)	最大径 を有する 筒数	筒数	最大径 (mm)	最大径 を有する 筒数
A				18			78	2	2~3	6	3	2	21	3	1	77		
B	4	2	1	14			132	1	2~3	11	3	11	17	3	1~2	116		
C	1	2	1	25			102	3	12	7	5	1	22	3	2	95		
D	2	1	1	14			129	2	3	5	2	1	11	2	2	39		
M	1	0.5	1	11			170	2	2~3	9	6	1	8	5	1	120		
E	2	3	1	16			104	3	11	9	5	1	14	3	2	130		
F	2	2	1	35			87	3	2	3	6	1	7	4	1	117		
G	2	1	1	27			92	2	2~3	3	3	1	14			133		
H	1			10			87	3	2~3	3	3	1	11			134		
異物 面積	0.01 %						0.1 %						0.03 %					
(M区)	Negligible small						0.01%						0.05%					

TABLE 7. Distribution of scratches and stairs etc.

会社名 種類 区分	Corning Co.			Penberthy Co.			Nippon Kogaku		
	きず	よごれ	その他	きず	よごれ	その他	きず	よごれ	その他
A		5~6 cm の 塗料のたれ	油気泡7箇 大きさ 3~4×1.5 cm					中央上部層 状のもの	
B							小さな折曲 ったもの		
C	下部に長さ 5 mm 程度 のもの3箇			小さなもの		i) 大きな折 込み ii) 3番目の ガラスに曇 り	下方にカス りきず状の もの		
D		5~6 cm の 塗料のたれ	油気泡12箇 大きさ 1~2×1.5 cm	左下方に小 さなもの	4番目のホ ットサイド によごれ		上部にふき きず		照射室に取 付後 lead wire のと ころから硬 化剤のたれ 2条
M									
E	小さなもの 3箇						下部に小 さなもの		
F								かなりはっ きりしたよ ごれ	
G									
H	小さなもの 3箇						右方に脈理 のようなき ず, または よごれ		

第4番目の low density の構成ガラスに多く、特に第2番目のガラスにたくさんあることが確認された。

その他、きず、よごれおよび折込みを各社製品について表記すれば第7表のようになる。その1例を写真5に示す。Corning 社製の窓は A, D の所にワク金

具の塗料が少したれており、C, E および H 部に小さなきずがあるが、全般的には非常にきれいで、中央部には全然きずなどがなく良好である。

Penberthy 社製では C 部に曇りがあるのは、coating の不良によるものではないかと考えられる。ま

た C 部の下部には折込みがあるが、ほとんど視界には影響がない。しかしながら、中央部 M にきずやよごれがあり (第5番目のガラス) 約1カ月後に再検査したときは曇りの度合もひどくなっており、はなはだ好ましくない。

日本光学社製の窓では、B, C, D, E および A の部に、きずはあるが、それもかすりきず程度である。よごれは A および F 部にあり、F 部のものはかなりはっきり見られるが、中央部にはきず、よごれが全然なく、この点は非常に良い。しかし、D 部にテープ取付後生じた lead wool の充テン部から硬化剤の未乾燥による流れが2条さがっている。これは非常に妨害になる (写真9)。

#### 4. 2. 脈理

脈理の存在のための像の変形、ほけおよび切断の状況は 3. 2. 1 の方法で求められる。その結果の1例を写真6に示す。Shlieren 法によって求めたものが写真7, 8 および9であり、間接法を用いて全視野に現われたものは第7, 8 および9図である。これらによって、脈理そのものの大きさ、深さ、形状などがはっきり認められる。

さらに脈理が構成ガラスのいずれに含まれているかを知るため、断層写真法とバラックス法によるものとの両者の結果を分析し、その位置を決定した。その結果を各製作会社ごとに述べる。

(i) Corning 社製のシャヘイ窓は写真7 および第7図でわかるように、脈理が非常に少ないが中央上部付近にほぼ長円形をなしている脈理が見られる。これは第2番目の比重 3.27 nonbrowning lead glass (Glass-8362) にあることが判明した。

(ii) Penberthy 社製のシャヘイ窓の場合には写真8 および第8図で認められるように、コールドサイドから見ると右下方から中央を通っているもの (a と呼ぶ、以下同じ)、右下方から上方に向いている脈理 (b)、左上方に向いた集団的なもの (c)、および左方中央部より左上方部にわたっているかなり大きな脈理 (d) がある。これらのうち a, b および c の脈理は同一ガラス中にあり、そのガラスは第7番目の比重 6.2 の nonbrowning glass (HiD-LRC) である。d 脈理は第6番目の同じ比重のガラスにあることが判明した。

以上大きな脈理について分析したが第6および第7番目の high density のガラスを脈理の少ないガラスにとりかえると、さらにより visual observation field がえられる。

(iii) 日本光学社製のものもコールドサイドから見ると、写真9 および第9図で明らかなように、中央から左の方向に分布して、下部より上部までひろがった、乱れた層状のもの (a)、中央部に分布して、左の方向に上昇している一群 (b)、右下部の集団 (c)、中央上部を左から右に走っている線状のもの (d)、左下方の部分にある山状の脈理 (e) および中央を左から右に走っている線状のもの (f) などがある。そのうち、a 脈理は第6番目の比重 6.2 の nonbrowning glass (F62-R) に含まれ、b, c, d, e 脈理は第3番目の比重 3.6 のガラス (F36-N) の中に含まれていることが判明した。さらに f 脈理は比重 6.2 のガラス (SFS-R) の中にある。以上の結果から、第3番目の F36-N のガラスに大きな脈理がだいぶ含まれていることが明らかとなった。

#### 4. 3. ひずみ応力

ひずみ応力の分布状態は写真10, 11, および12によって知ることができる。以下各社の製品についてそのひずみの程度を検査しよう。

(i) Corning 社、日本光学社製の窓は写真10, 12の模様の状態から、ひずみがかなり入っていることがわかる。これはホット、およびコールド両側にある強化ガラスによるものである。写真10と写真12の比較から、強化の程度は日本光学社の窓の方が Corning 社の窓より細かく強化されていることがわかる。日本光学社のガラスはこの強化により、衝撃強度が約5倍高くなったことがわかった。

(ii) Penberthy 社製の窓は、写真11に見られるように、Corning 社および日本光学社製の窓より模様の変化が単純で、ほとんど黄赤色である。これは強化によるひずみではなく、焼ナマシあるいはワク取付けによるひずみである。また窓の中心にたいして非常によく対称分布を示している。このしま模様から対角線の長さ、すなわち  $20\sqrt{2} \times 2.54$  cm につき、しまが3本程度である。光の波長  $\lambda$  を Na-D 線 ( $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$ ) であると仮定すれば

$$(3/2\lambda_D)/(20\sqrt{2} \times 2.54) = 12.6 \text{ m}\mu/\text{mm}$$

となる。この場合、光はシャヘイ窓の構成ガラス全部を通っているため、この結果をそのまま適用することはできない。いまかりに1枚の同等のガラスと仮定すれば、光学ガラスの規格<sup>4)</sup>にあてはめると不合格であるが、パイレックスの場合は合格になる。したがって窓ガラスとしてはこの程度のひずみ応力の存在は許容される。

以上の結果から、この窓ガラスのひずみは全部のガ

TABLE 8. Transmittance of white light through shielding window

会社名	Corning Co.	Penberthy Co.	Nippon Kogaku
$L$ (cm)	116.0	100	150
$L'$ (cm)	73.0	68	112.0
$T_{exp}$ (%)	46.0	28.5	45.3
$T_p$ (%)	18.2	14.3	25.0
$T_{cal}$ (%)	17.0	13.0	23.2

ラスにつきこの程度であるから、両側のいわゆる強化ガラスは他の2社の製品に比較して、ほとんど強化されていないことは明らかである。

#### 4. 4. 透過度

各シャヘイ窓について、それらの構成ガラスのNa-D線にたいする資料をもとにして(1)、(2)式から計算した $L'$ と $L$ を用いて距離の補正をした実際の透過率 $T_p$ を第7表に示してある。また理論式(3)および

(8)を用いて計算した値 $T_c$ は第8表の下欄に示してある。この結果、実測値と計算値は良く一致している。

日本光学社の窓の透過度は25%で、もっとも良く、次にCorning社製のものは18%である。Penberthy社のものは14%で、もっとも悪い。なおPenberthy社製の場合には光源として懐中電灯を用いて測定したので、参考までにあげると、測定値の校正をおこなった値は約

13%であった。

#### 4. 5. その他

写真13で明らかにわかるように、白色光が吸収されて透過するものは段々と黄色に変わって、しかも反射のたびごとに暗くなっている。また反射像は一直線に並んでいない。これはPenberthy社の窓についての写真であり、ガラス面の平行度がよくない。特に第5、第6番目の面が他の面との平行が悪いことがわかる。

## 5. 結 論

これらの実験の結果からつぎのことがいえる。

(i) アフ、石その他の異物の点から各窓ガラスの良否を比較すれば、窓の全面積に対する異物の占める面積比はCorning社製、日本光学社製およびPenberthy社製窓の順となっている。しかし中央部の視界の立場から検討すれば、第6表に示したように、日本光学社製窓がPenberthy社製窓の5倍程度になり、この点改修する必要がある。

(ii) 脈理の点から考えれば、Corning社製窓は非常に優秀であるが、日本光学社製、およびPenberthy社製窓は相当大きい脈理がある。

(iii) 透過度については第8表に示されるように、日本光学社製窓は特に明るい。Corning社製窓も日本光学社製窓について明るい。Penberthy社製窓はこれらに比べると非常に暗い。しかも曇りの程度が時間の経過とともにほだしくなり、非常な曇りになる。

(iv) ひずみ応力の検査の結果、日本光学およびCorning社製はともに両面のガラスが非常に良く強化されているがPenberthy社製のものはほとんど強化されていない。

(v) きず、よごれなどの立場から検討すると、Penberthy社製窓は比較的よく、つぎにCorning社製窓の順である。日本光学社製窓はかすりきず、ふき

きずなどが目につき、またよごれもかなり見られる。その上、硬化剤のたれなどがガラス面につき、改善する必要があると認められる。

(vi) 平行度については、各反射像の様子からいずれの会社の製品も、完全に平行になっていない。これは多重ガラス窓の構成上、平行度を少し乱しておくとも考えられ、今後研究すべき問題である。

(vii) 総合的にCorning社製窓がもっとも優れており、つぎに日本光学、Penberthy社製窓の順となる。

このようなシャヘイ窓の国産化は、日本光学工業株式会社によって初めて完成したものであるが、この窓は最初の製品であったので、Corning社製窓に比べて、脈理、異物などの含有量は多い結果となった。しかしこの研究結果をもとにして、脈理、異物の除去に努力すれば、Corning社製に比して劣らない製品ができることと考える。

最後に本研究の、実験に御協力をいただいた日本光学工業株式会社の塩見桂三、高橋文氏ならびに住田光学硝子製造所の鈴木哲夫氏に厚く謝意を表す。

#### 参 照 文 献

- 1) 物理実験学(河出書房)第5巻, 336 (1943)
- 2) JIS, 9, (1957)
- 3) 物理実験学(河出書房)第5巻, 370 (1943)
- 4) JAN-G-174

正 誤 表

頁	行	誤	正
Photo 4.		Bubles	Bubbles
Abstract	上より7行目	jogging	fogging
Contents	左上より4行目	Buble	Bubble
	右上より4行目	Buble	Bubble
1	左上より3行目	ケーブル	ケープ
6	右 $f(\theta)$ の2行目	$n=1$	$N-1$
	右 $f(\theta)$ の3行目	$N$	$N-1$
		$\sin^2 \theta$	$\sec^2 \theta$
7	左 (8) 式	$T_{c1} = \frac{nk_i + k_i b}{(a+b+\Sigma+\Sigma)^2}$	$T_{c1} = \frac{\pi \dots}{\dots} F(\theta)$
8	1行目	bubfles	bubbles
8	Table 7	stairs	stains
9	左下より7行目	nonbrowning glass	ガラス
	右上より9行目	nonbrowning glass	ガラス
	" 11行目	ガラス	nonbrowning glass
10	右下より7行目	高橋文氏	高橋文夫氏