

JAERI-Tech  
2003-001



JP0350055



JRR-3中性子導管ガラス母材の  
機械的強度に関する検討

2003年2月

小林 哲也

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

JRR-3 中性子導管ガラス母材の機械的強度に関する検討

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

小林 哲也

(2003 年 1 月 6 日受理)

JRR-3 に設置されている熱中性子導管は、設置後 6 年を経過した際に寿命評価が実施され鏡管ユニット側面のガラス母材に内部まで貫通するクラックの発生が確認された。そして、その原因について検討が行われた結果、 $\gamma$ 線照射によるガラス母材の脆化に加え、中性子導管を直接真空引きする方式による鏡管ユニットの静的疲労が主たる原因であるという結論が得られた。本報告書はこのような結果を基にガラス母材の機械的強度について定量的に評価し、さらに疲労破壊に達するまでの時期について予測するものである。なお、この予測に基づき中性子導管の寿命評価を行い、2000 年及び 2001 年に行われた熱中性子導管 T1 及び T2 のスーパーミラーへの更新時期について、その妥当性を確認した。

**Mechanical Strength Evaluation of the Glass Base Material  
in the JRR-3 Neutron Guide Tube**

Tetsuya KOBAYASHI

Department of Research Reactor  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 6, 2003)

The lifetime of the thermal neutron guide tube installed JRR-3 was investigated after 6 years from their first installation. And it was confirmed that a crack had been piercing into the glass base material of the side plate of the neutron guide tube. The cause of the crack was estimated as a static fatigue of the guide tube where an inside of the tube had been evacuated and stressed as well as an embrittlement of the glass base material by gamma ray irradiation. In this report, we evaluate the mechanical strength of the glass base material and estimate the time when the base material gets fatigue fracture. Furthermore, we evaluate a lifetime of the neutron guide tube and confirm the validity of update timing in 2000 and 2001 when the thermal neutron guide tubes T1 and T2 were exchanged into those using the super mirror.

**Keywords :** Neutron Guide Tube, Glass Base Material, Static Fatigue , JRR-3

# 目 次

1.はじめに	1
2.JRR-3の中性子導管	2
3.評価試料の概要	7
3.1 評価試料の選定	7
3.2 ガラス母材の組成	7
3.3 照射履歴	8
4.ガラス母材の機械的強度評価	8
4.1 理論強度	8
4.2 実用強度	9
4.3 ガラス母材の破壊強度	9
4.4 機械的負荷の検討	10
4.5 静的疲労	13
5.放射線照射による影響	13
5.1 中性子照射による影響	13
5.2 $\gamma$ 線照射による影響	14
6.結論	14
謝辞	15
参考文献	16
付録A	17
付録B	19

## Contents

1. Introduction	1
2. JRR-3 Neutron Guide Tube	2
3. Outline of Evaluation Sample	7
3.1 Selection of Evaluation Sample	7
3.2 Composition of the Glass Base Material	7
3.3 Irradiation Record	8
4. Mechanical Strength Evaluation of the Glass Base Material	8
4.1 Theory Strength	8
4.2 Practical Use Strength	9
4.3 Destruction Strength of the Glass Base Material	9
4.4 Examination of the Mechanical Load	10
4.5 Static Weariness	13
5. Influence by the Ray Irradiation	13
5.1 Influence by the Neutron Irradiation	13
5.2 Influence by the $\gamma$ Ray Irradiation	14
6. Conclusion	14
Acknowledgements	15
References	16
Appendix A	17
Appendix B	19

## 1. はじめに

ニッケル表面で起こる中性子の全反射を利用して研究用原子炉等で発生する中性子を少ない損失で遠方まで導き、中性子散乱実験設備等に供給するための機器として、ニッケル単層膜中性子導管が 1960 年代に Maier-Leibnitz によって提案された。JRR-3 では 1990 年に、改造にあわせて中性子導管の設置を行った。以来、中性子導管はビーム実験者のために高品質の中性子を供給し続け、そのビーム実験の利用効率を飛躍的に増加させた。

しかし、共同利用運転開始後 10 年を経過し、炉心に近接する中性子導管の基板材料であるガラス母材に照射による脆化が現れたため一部交換作業が行われた。この際、それまでのニッケル単層膜中性子導管からスーパーミラー中性子導管に変更された。更新作業は施設定期自主検査期間を利用し、2000 年に熱中性子導管 T2 のうち曲管部までを置換、2001 年には熱中性子導管 T2 の直管部及び熱中性子導管 T1 の曲管部までを更新した。T1 の直管部については 2002 年現在、更新計画が進行中である。2001 年までに更新完了した部分における中性子束の実測値は、工事前後で比較して最高で約 3 倍程度の強度となった<sup>1) 2)</sup>。Table1.1 に 2001 年における T1、T2 ポートのスーパーミラー化による工事前後の中性子束実測値を示す。

JRR-3 中性子導管は、設置後 6 年を経過した 1995 年 12 月に日本原子力研究所研究炉部研究炉利用課の鈴木正年氏によって寿命評価試験が行われており、その際に鏡管ユニットの側面のガラス母材に内部まで貫通するクラックの発生が確認された。そして、その原因について検討が行われた結果、 $\gamma$ 線照射によるガラス母材の脆化に加え、中性子導管を直接真空引きする方式による鏡管ユニットの静的疲労が主たる原因であるという結論が得られた。

本報告書は上記の結果を基にガラス母材の機械的強度について定量的評価を行い、中性子導管の寿命を予測することで、今後の中性子導管、及びスーパーミラーの交換時期の検討に資することを目的としたものである。

Table1.1 2001年におけるT1、T2ポートのスーパーミラー化による工事前後の中性子束実測値

測定ポート	工事前の中性子束 [n/cm <sup>2</sup> /s]	工事後の中性子束 [n/cm <sup>2</sup> /s]	比		装置名
T1-1 上	$9.51 \times 10^7$	$3.50 \times 10^8$	3.68	3.70	HQR
T1-1 中	$9.37 \times 10^7$	$3.52 \times 10^8$	3.76		
T1-1 下	$9.72 \times 10^7$	$3.56 \times 10^8$	3.66		
T1-4 中	$1.22 \times 10^7$	$3.41 \times 10^7$	2.80	2.80	PGA
T2-1 上	$2.70 \times 10^8$	$2.82 \times 10^8$	1.04	1.8	RESA
T2-1 中	$2.62 \times 10^8$	$2.86 \times 10^8$	1.09		
T2-1 下	$2.62 \times 10^8$	$2.87 \times 10^8$	1.10		
T2-4 上	$1.31 \times 10^8$	$1.66 \times 10^8$	1.27	1.11	TAS-2
T2-4 中	$1.29 \times 10^8$	$1.28 \times 10^8$	0.992		
T2-4 下	$1.24 \times 10^8$	$1.33 \times 10^8$	1.07		

## 2. JRR-3 の中性子導管

JRR-3 の中性子導管は炉心近傍から JRR-3 原子炉建家に隣接する実験利用棟ビームホールにわたり、液体水素を貯留する減速材容器に接続された水平実験孔(9C)に冷中性子導管 3 本と、重水減速材領域に接続された水平実験孔(8T)に熱中性子導管 2 本が設置されている。各々の中性子導管は特性波長を得るために、水平実験孔を直視しない位置の 1.5 倍の長さまで曲率を持たせて設置し、以降を直線上に設置している。曲率を持たせることにより、直進する高速中性子と  $\gamma$  線を除去することが可能であり、目的とするエネルギーの中性子を得るものである。JRR-3 中性子導管設置概略図を Fig.2.1 に、また、鏡管ユニット設置概略図を Fig.2.2 に示す。

JRR-3 の中性子導管は、長さ約 85[cm]のいくつもの鏡管ユニットを接続して構成される。Fig.2.3 に鏡管ユニット（標準型）概略図を示す。鏡管ユニットは、中性子を全反射するために十分な表面精度が要求されるため、ガラスの基板を採用し、これにニッケルをスペッタリングしている。また、中性子導管内部を通る中性子の損失を防ぐため、中性子導管内部を  $5 \times 10^{-2}$ [Torr]程度の真空状態としている。

熱中性子導管の幾何学的条件及び特性波長を Table2.1 に、また、鏡管ユニット（標準型）の基本仕様を Table2.2 に示す。

Table.2.1 热中性子導管の幾何学的条件及び特性波長

導管 No.	特性波長 [Å]	断面寸法 H×W[cm]	水平実験孔内 長さ[m]	曲管部		直管部 長さ [m]	全長 [m]
				曲率半径 [m]	長さ [m]		
T1	2	20×2	1.54	3337.4	35.72	22.65	59.91
T2	2	20×2	1.54	3337.4	35.73	21.71	58.98

Table.2.2 鏡管ユニット（標準型）の基本仕様

ユニット名称・記号	母材材質	側板長さ b [mm]	側板高さ a <sub>0</sub> [mm]	側板計算高さ a[mm]	側板厚さ h[mm]
熱中性子用標準型・ TA	ホウケイ酸 ガラス	850	240	200	20

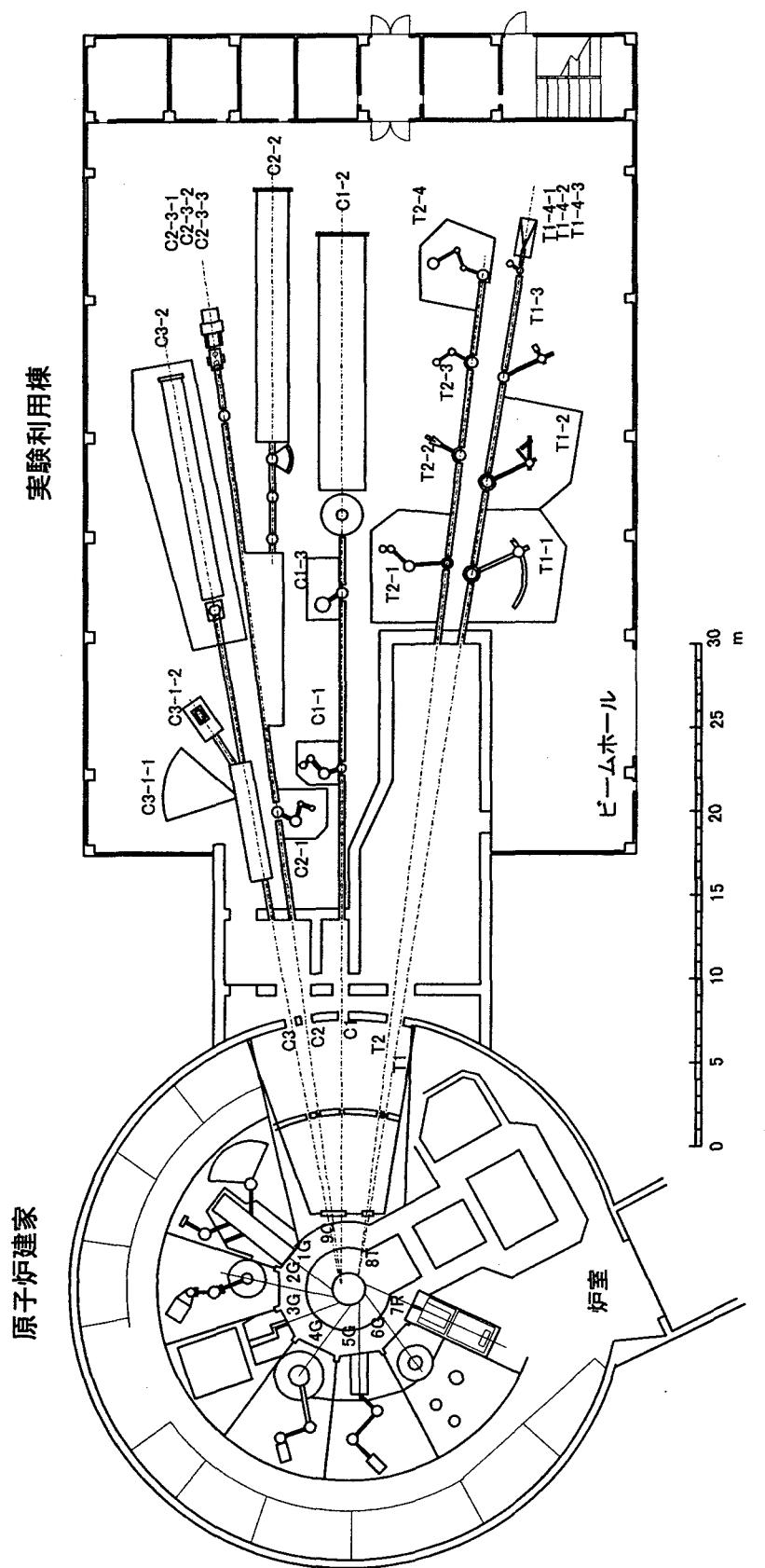


Fig.2.1 JRR-3中性子導管設置概略図

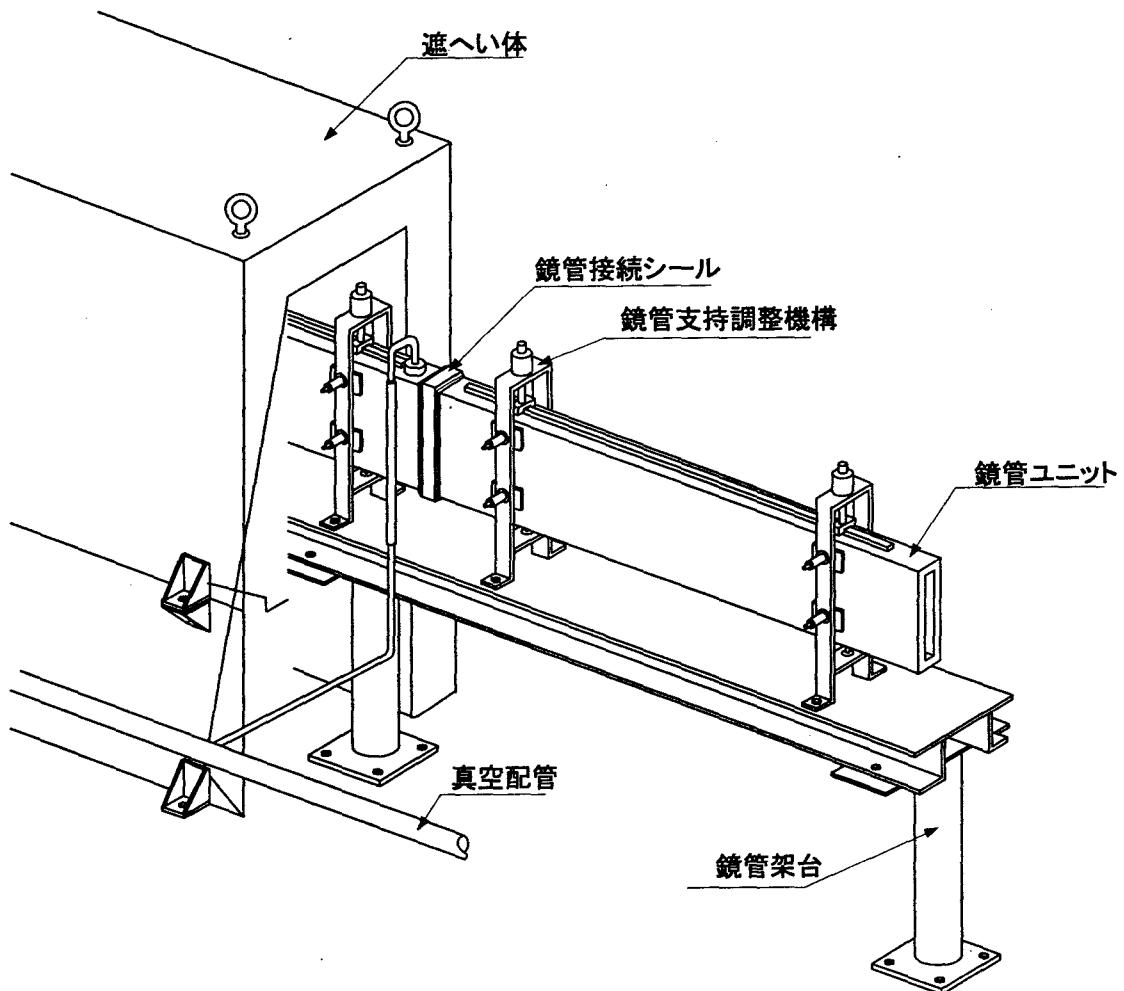
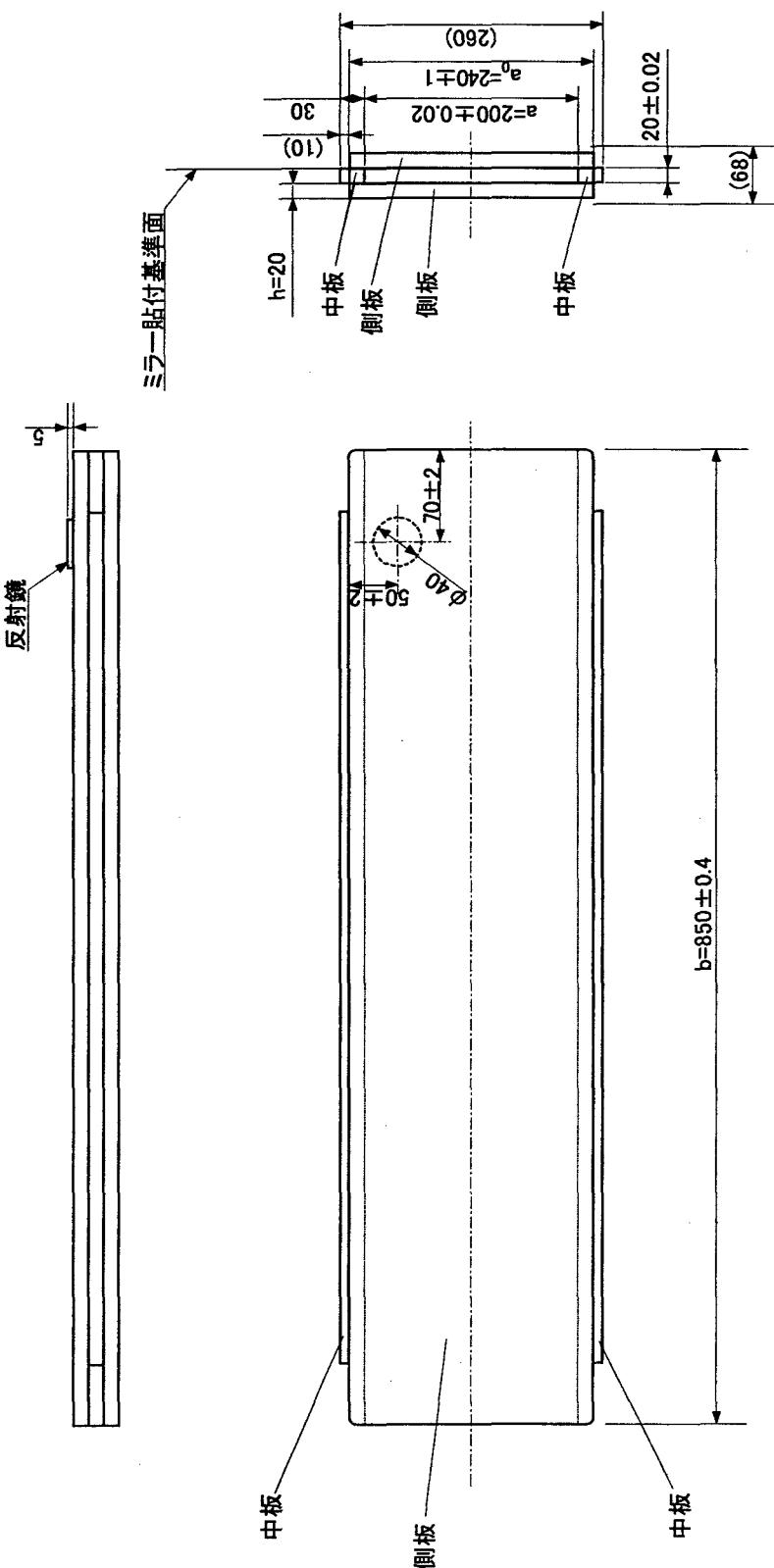


Fig.2.2 鏡管ユニット設置概略図



主要材質: ホウケイ酸ガラス

Fig.2.3 標準型鏡管ユニット概略図

### 3. 評価試料の概要

#### 3. 1 評価試料の選定

本報告の評価試料としては、熱中性子導管用鏡管ユニットを用いた。これは熱中性子導管が、冷中性子源装置(CNS)を介して設置されている冷中性子導管と比較して高速中性子や $\gamma$ 線の照射が強いために照射劣化の進行が比較的早いと考えられ<sup>3)</sup>、機械的強度への影響も大きいと判断したためである。なお、試料は鈴木氏の評価試験に用いられたものと同様のものである。当時、クラックが発見された鏡管ユニットは熱中性子導管T1の始点から1番目の鏡管ユニット（以下「T1 鏡管ユニット」と呼ぶ。）であり、また、その比較のために用いられた試料が熱中性子導管T2の始点から2番目の鏡管ユニット（以下「T2 鏡管ユニット」と呼ぶ。）である。その形状はどちらも標準型である。JRR-3 中性子導管として設置されている鏡管ユニットにはその用途に合わせて、いくつかの形状のものが用いられているが、先に述べたとおりT1 鏡管ユニット及びT2 鏡管ユニットは共に標準型であることから、本報告では標準型についてのみ評価を行うこととする。

鏡管ユニット（標準型）はFig.2.3に示す構造を有することから、真空引きによる機械的負荷の影響は主に側板のガラス母材に顕著に現れる。よって、鏡管ユニットを構成するガラス母材のうち上下部分を構成しているものについては、側板のガラス母材の形状と比較すると機械的負荷による影響が十分小さく無視出来ると考えられるので、本報告では側板のガラス母材のみ評価することとする。

#### 3. 2 ガラス母材の組成

ガラスは無機の酸化物の溶融した混合物である。それらは唯一の決まった組成を持つわけではなく、数千種類の異なった組成のガラスが製品として生産されている。しかしこれらの多様な種類の大部分は3つの主なグループ、すなわちソーダ石灰ガラス、ホウケイ酸ガラス、及び鉛ケイ酸ガラスに分けて考えることができる。鏡管ユニットのガラス母材に用いられているものは、この中のホウケイ酸ガラスである。ホウケイ酸ガラスの一般的な組成をTable3.1に示す。ホウケイ酸ガラスに熱中性子を照射すると、 $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)\gamma\text{Li}$ が起こる。ガラスが中性子の影響を受けている場合、それはガラス中に約12%含まれる酸化ホウ素の減少によって確認することができる。

Table.3.1 ホウケイ酸ガラスの一般的組成

	組成（重量%）						
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ホウケイ酸ガラス	80.6	4.2	0.1	0.05	12.6	2.2	0.05

### 3. 3 照射履歴

JRR-3 は 1990 年 11 月から熱出力 20MW の定格出力運転を開始した。JRR-3 の運転基本パターンは連続 4 週間の定格出力運転と 1 週間の燃料交換等の運転準備週からなる 5 週間サイクルである。クラックが発見された T1 鏡管ユニットは、38 サイクル（熱出力 20MW の定格出力運転を 21,164 時間）の照射を受け、T2 鏡管ユニットは 33 サイクル（熱出力 20MW の定格出力運転を 18,262 時間）の照射を受けている。水平実験孔(8T) 出口での中性子束は、T1 鏡管ユニット出口が約  $7.9 \times 10^9 [\text{n/cm}^2/\text{s}]$ 、T2 鏡管ユニット出口が約  $6.8 \times 10^9 [\text{n/cm}^2/\text{s}]$  である<sup>2)</sup>。それぞれの鏡管ユニット設置位置における中性子量は T1 鏡管ユニットが約  $6.0 \times 10^{17} [\text{nvt}]$ 、 $\gamma$  線吸収線量は約  $2.1 \times 10^6 [\text{Gy}]$  であり、T2 鏡管ユニットが約  $4.5 \times 10^{17} [\text{nvt}]$ 、約  $3.6 \times 10^5 [\text{Gy}]$  である<sup>3)</sup>。

各鏡管ユニットの照射履歴等を Table3.2 に示す。

Table3.2 鏡管ユニットの照射履歴等

	中性子量	吸収線量 [Gy]	熱出力 20MW 照射時間 [h]	設置位置
T1 鏡管ユニット	$6.0 \times 10^{17} \text{nvt}$	$2.1 \times 10^6$	21,164	T1 導管先端部
T2 鏡管ユニット	$4.5 \times 10^{17} \text{nvt}$	$3.6 \times 10^5$	18,262	T2 導管 2 番目

### 4. ガラス母材の機械的強度評価

ガラスの機械的強度の測定値は、金属等とは異なり非常にばらつきが大きいという特徴を持っている。また、低温におけるガラスの破壊様式は典型的な脆性破壊であって、塑性変形をほとんど示さずに臨界応力のもとで急激に破壊する<sup>4)</sup>。このような、特殊な性質を持つガラスについて論ずるために、その基本特性について以下に示す。

#### 4. 1 理論強度

完全に均一で欠陥が存在しないガラスを考えると、その理論強度を原子間作用力から見積もることができる。Orowan の取り扱い方にしたがって、原子間力に逆らって原子を引き離す仕事がすべて新しい面を作るためのエネルギーに変化するとして式の誘導を行えば、理論強度  $\sigma_{th}$  を与える次のような式が得られる<sup>4)</sup>。

$$\sigma_{th} = (\Gamma_s E / \gamma_0)^{1/2} \quad (4.1)$$

ここで、 $\gamma_0$ ：原子の平均距離 [nm]

$E$ ：ヤング率 [GPa]

$\Gamma_s$ ：新しい面の形成に必要な単位面積当たりのエネルギー [J/m<sup>2</sup>]  
(表面エネルギー)

である。

以下に示すガラスに対する典型的なパラメータに基づき<sup>4)</sup>、

$$E = 70[\text{GPa}]$$

$$\gamma_0 = 0.2[\text{nm}]$$

$$\Gamma_s = 0.3[\text{J/m}^2] \text{ (高温における表面張力データからの推定値)}$$

を式(4. 1)に代入してガラスの理論強度を概算してみると、 $\sigma_{th} = 10[\text{GPa}]$ 程度になる。しかし、通常のガラス製品の強度は100[MPa]前後<sup>4)</sup>であって、理論強度よりも2桁あるいはそれ以上も低く、また強度測定値のばらつきも多い。

#### 4. 2 実用強度

前節で記したように通常のガラスの強度、つまり実用強度は理論強度よりも2桁あるいはそれ以上も低い。このような理論強度と実用強度との間の大きな差は、理論強度のモデルとして何らの欠陥も含まないガラスを想定したことに起因する。このことを説明するものとして、グリフィスフローがよく知られている。これは、1920年にGriffithによって発案された考え方<sup>4)</sup>であり、ガラスの内部や表面には大小のきずが存在し、これが応力集中源となって、理論強度よりもはるかに低い負荷のもとで破壊が生ずる、というものである。以前はグリフィスフローはガラスの構造に関係する存在であると考えられていたが、今日では製造工程や使用過程で外的に生じた傷でありガラスの構造とは直接関係するものではないと考えられている。このグリフィスフローが実用ガラスの強度を下げているわけであるが、通常のガラスの製造工程や使用時においては他の物体と接触することは避けられず、必ず何らかの機械的損傷を受けていると考えなければならない。実際、高温で成形後、他の物体とまったく接触しないように注意深く扱われた処女ガラスの強度は高く、理論強度よりも1桁低い程度の値を示す<sup>4)</sup>。

#### 4. 3 ガラス母材の破壊強度

鏡管ユニットのガラス母材として用いられているホウケイ酸ガラスの破壊強度 $\sigma_f$ についてここで示す。

破壊力学的観点から考えると、ホウケイ酸ガラスの破壊強度 $\sigma_f$ は破壊エネルギーの考え方を用いることによって、次式<sup>5)</sup>から計算することができる。

$$\sigma_f = (2 \Gamma E / \pi c_{max})^{1/2} \quad (4.2)$$

ここで、 $\sigma_f$  : ホウケイ酸ガラスの破壊強度  
 $\Gamma = 6.0 \text{ [J/m}^2]$  : ホウケイ酸ガラスの破壊エネルギー (真空中)  
 $E = 61.74 \text{ [GPa]}$  : ヤング率  
 $c_{max} = 2.54 \times 10^{-6} \text{ [m]}$  : 試料表面に存在するきずの最大値  
(ここではグリフィスフローの理論寸法を用いる)

である<sup>5)</sup>。

これらの値を用いて計算すると、

$$\sigma_f = 304.71 \times 10^6 \text{ [Pa]}$$

ガラスの実用強度は過去の実験等から経験的に理論強度の値より 2 衍程度低いとされているが、前述のように理論強度は約 10[GPa]前後ということが知られているので、破壊力学に基づいた式から求めたこの破壊強度の値を実用破壊強度として用いてかまわない。

よって、本報告で用いるホウケイ酸ガラスの実用破壊強度  $\sigma_f$  を、

$$\sigma_f = 304.71 \text{ [MPa]}$$

とする。

#### 4. 4 機械的負荷の検討

鏡管ユニットに用いられているガラス母材は Fig.2.3 に示すように、上下二辺を接着して作られている。したがって、鏡管ユニットガラス母材の側板は相対する二辺固定、相対する二辺支持の長方形平板とみなすことができ、これに機械的負荷がかかり曲げ応力及びたわみが発生する。

中性子導管は運転中、鏡管ユニット内部を真空引きにより、 $5 \times 10^{-2} \text{ [Torr]}$ 程度の状態にしている。真空度を表す単位には汎用的に使われていた単位に Torr (トル) がある。これは圧力の単位と同じであり、Pa (パスカル) とは、以下の関係がある。

$$1 \text{ 気圧} = 1.01325 \text{ [Pa]} = 760 \text{ [Torr]}$$

$$\therefore 133.32 \text{ [Pa]} = 1 \text{ [Torr]}$$

この関係より、中性子導管は鏡管ユニット内部を  $5 \times 10^{-2}$ [Torr]まで真空引きしているので、この時の内部圧力をパスカルで表すと、

$$\begin{aligned} & 5 \times 10^{-2}[\text{Torr}] \times 133.32 \\ & = 6.666[\text{Pa}] \\ & \approx 6.67[\text{Pa}] \end{aligned}$$

大気圧が 101,325[Pa]なので、鏡管ユニット内部と大気圧との差がガラス母材に加わる圧力であり、その値は、

$$\begin{aligned} & 101,325[\text{Pa}] - 6.67[\text{Pa}] \\ & = 101.318 \times 10^3[\text{Pa}] \\ & \approx 101.32[\text{kPa}] \end{aligned}$$

であり、板面には一様に 101.32[kPa]（大気圧）の圧力が加わっていると考えてよい。よって、材料力学的見地から考えると一様分布荷重  $P$  を受ける、相対する二辺固定、相対する二辺支持の長方形平板の曲げの問題として考えることができる。

前述のとおり、鏡管ユニットのガラス側板は相対二辺固定、相対二辺支持の支持条件であり、寸法は Fig.2.3 より  $a_0=240[\text{mm}]$ 、 $b=850[\text{mm}]$ 、 $h=20[\text{mm}]$  である。

ここで、 $a_0$  は両端が板厚  $h$  で固定されているので、

$$\begin{aligned} a &= a_0 - 2h \\ &= 200[\text{mm}] \end{aligned}$$

である。 $a$  を後の計算で用いる短辺とする。

また、ホウケイ酸ガラスのヤング率、及びポワソン比は、

$$\begin{aligned} E &= 61.74[\text{GPa}] && : \text{ヤング率} \\ \nu &= 0.20 && : \text{ポワソン比} \end{aligned}$$

である<sup>6)</sup>。

前述のように、ガラス母材は真空引きによる影響で母材一面に一様な等分布荷重  $P=101.3[\text{kPa}]$  を受けている。したがって、これらの条件からガラス母材の最大たわみ  $w_{\max}$ 、及び最大応力  $\sigma_{\max}$  を求める。

長方形平板の最大たわみ、及び最大応力は一般に以下の公式を用いることにより求めることができる。ただし、 $a < b$  の場合である。

$$w_{max} = \alpha \cdot p \cdot a^4 / (E \cdot h^3) \quad (a < b) \quad (4.3)$$

$$\sigma_{max} = \beta \cdot p \cdot a^2 / h^2 \quad (a < b) \quad (4.4)$$

ここで、 $w_{max}$	: 最大たわみ
$\sigma_{max}$	: 最大応力
$P=101.32[\text{kPa}]$	: 等分布荷重
$a=200[\text{mm}]$	: 長方形平板の短辺長さ
$h=20[\text{mm}]$	: 長方形平板の板厚
$E=61.74[\text{GPa}]$	: ヤング率
$\alpha=0.03$	: 最大たわみ係数
$\beta=0.50$	: 最大応力係数

なお、  $\alpha$ 、及び  $\beta$  はそれぞれ、中性子導管ガラス母材の形状、支持条件、及びポワソン比によって定まる定数である<sup>7)</sup>。この定数は  $\nu=0.30$  のときの値であり、厳密には  $\nu=0.20$  のときの値を用いるべきであるが、ガラスの実用強度のばらつきの大きさと比較すると、この値で計算することによって生ずる誤差は十分に無視できると考えられるので、多くの文献でよく知られている  $\nu=0.30$  のときの定数を用いて  $w_{max}$  及び  $\sigma_{max}$  を計算する。

よって、既知の値を式 (4. 1)、(4. 2) にそれぞれ代入して計算すると、

$$\begin{aligned} w_{max} &= 0.03 \times 101.32 \times 10^3 [\text{Pa}] \times (200 \times 10^{-3} [\text{m}])^4 / (61.74 \times 10^9 [\text{Pa}] \\ &\quad \times (20 \times 10^{-3} [\text{m}])^3) \\ &= 9.85 \times 10^{-6} [\text{m}] \\ &= 9.85 [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= 0.50 \times 101.32 \times 10^3 [\text{Pa}] \times (200 \times 10^{-3} [\text{m}])^2 / (20 \times 10^{-3} [\text{m}])^2 \\ &= 5.07 \times 10^6 [\text{Pa}] \\ &= 5.07 [\text{MPa}] \end{aligned}$$

ここで、ガラス母材の実用破壊強度  $\sigma_f=304.71[\text{MPa}]$  であるので、

$$\sigma_{max} \ll \sigma_f$$

となる。

この結果より、板に発生する最大応力はガラス母材の実用破壊強度に比べ十分小さいことが分かる。

なお、ガラス母材は長方形平板なので最大たわみは平板の中央に、また、最大応力（引張応力）は長辺中央に生ずる。

#### 4. 5 静的疲労

一般にガラスの強度は周囲の雰囲気、特に水分の影響を受け荷重時間が長いほど、また荷重速度が小さいほど低下する。このような強度の荷重時間依存性をガラスの静的疲労と呼ぶ<sup>6)</sup>。ガラスの静的疲労現象は液体窒素や乾燥气体または真空中ではほとんど起こらないことから、主に雰囲気中に含まれる水分と固体とが応力が作用しているクラック先端で化学的に反応することに起因していると考えられている<sup>4)</sup>。つまり、グリフィスフローが引張応力によってクラックに進展するであろうガラス母材の面と接する雰囲気中に水分が完全に含まれていなければ、ガラスと水分がクラック先端において化学的反応を起こす可能性が無く、たとえ静的疲労の荷重条件下に置いたとしても破壊強度以下ではクラックは進展せず破壊には至らないと言える。

このことだけに着目しその他の影響を無視すれば、JRR-3 中性子導管は導管内部が真空状態であるのでガラス母材は静的疲労の影響をほとんど受けないと考えられる。しかし後で述べるが、 $\gamma$ 線による化学反応度特性への影響が静的疲労の効果を促進させる可能性もあり、実際には、中性子導管内部に僅かでも水分が含まれていれば、真空であるという条件だけでは静的疲労の影響を完全に否定することはできない。

#### 5. 放射線照射による影響

##### 5. 1 中性子照射による影響

ガラス母材の組成の項でも述べたとおり、中性子導管のガラス母材に用いられているホウケイ酸ガラスは、熱中性子を吸収するとホウ素の  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反応を起こす。よって、中性子による影響を受けているとすれば、ガラス母材の組成に変化が現れるはずである。しかし、鈴木氏の報告によると  $\gamma$  線マイクロアナライザを用いて試料について調査を行ったところ、測定誤差以上の組成の変化は認められなかつたとしている<sup>3)</sup>。JRR-3 中性子導管は入射した中性子を約 95%以上の反射率で反射できるので、そのために中性子がガラス母材までほとんど到達せず、上記の反応に寄与する中性子量は少なかつたといえる。ニッケルーチタン多層膜であるスーパーミラー中性子導管については中性子反射率がニッケル単層膜中性子導管よりも高いため、他の要因によって中性子反射率が低下しない限り、当然中性子による影響はニッケル単層膜中性子導管より少ないと考えられる。

## 5. 2 $\gamma$ 線照射による影響

$\gamma$ 線は中性子導管の曲管構造によってガラス母材を通りぬけるので、その影響は中性子によるものよりも重要視しなければならないであろう。 $\gamma$ 線の照射によってガラスの色が黒化するのは良く知られており、本報告の試料に用いたT1鏡管ユニットについても黒化の現象は確認されている。よってガラス母材が $\gamma$ 線の照射を受けているのは確かである。しかし、W.A.ZDANIEWSKI らの報告<sup>8)</sup>によるとホウケイ酸ガラスは、 $\gamma$ 線の照射によって黒化するにもかかわらず、 $1.0 \times 10^6$ [Gy]レベル以下の照射ではほんのわずかな高密度化が起こるに過ぎず、機械的強度に影響しないとしている。

ここで、T1鏡管ユニットの $\gamma$ 線照射履歴について確認すると、前項で既に述べたように、クラック発生が確認されるまでに約 $2.1 \times 10^6$ [Gy]の照射を受けており、またクラックが発生していなかったT2鏡管ユニットは約 $3.6 \times 10^5$ [Gy]の照射であった。このことからも、 $1.0 \times 10^6$ [Gy]を超えたT1鏡管ユニットにはクラックが発生し、それを超えなかったT2鏡管ユニットにはクラックは発生していなかったということがうかがえ、W.A.ZDANIEWSKI らの報告と比較しても $1.0 \times 10^6$ [Gy]という照射量が機械的強度に影響を及ぼすしきい値と考えることは妥当であると言える。

また、 $\gamma$ 線の照射はクラック先端において機械的性質に直接影響するだけでなく、化学反応度特性へも大きく影響すると報告されている<sup>8)</sup>。このことを考慮すると、クラック進展に対する静的疲労の影響が非常に重要なものとなってくる。静的疲労は、クラック先端の水分による化学反応がクラックの成長に大きく寄与するものであるため、JRR-3中性子導管のように真空中で雰囲気内の水分の存在がわずかな場合でも、 $\gamma$ 線の照射によって化学反応が活性化された状態になれば、その影響は顕著に現れ、予想以上に小さな荷重でも静的疲労の条件を満たしていればガラス母材にクラックが発生することは十分に考えられる。

よって、 $\gamma$ 線の影響を考える場合は、機械的性質への影響だけでなく、化学反応度特性への影響、及びそれに伴う静的疲労による効果を総合的に考慮しなければならない。

## 6. 結論

本報告では、JRR-3 中性子導管の構造上の機械的負荷がガラス母材の寿命にどの程度影響するかについて検討を行った。その結果 JRR-3 通常運転状態においては、中性子導管にかかる機械的負荷の影響のみではガラス母材を破壊に至らせるには十分ではないとの結果が得られ、さらに、静的疲労の影響を単体で検討したところ、JRR-3 中性子導管の使用条件を考慮すると、その影響は非常に少ないという結果が得られた。このことから、本報告で検討した放射線の影響についても考慮し総合的に評価すると、T1鏡管ユニットのガラス母材にクラックを発生させた原因としては、 $\gamma$ 線による影響が非常に大きく、これが静的疲労の効果を促進したためであると考えることができる。

よって、中性子導管の寿命評価には $\gamma$ 線の吸収線量を評価の尺度として用いるのが最も重要であり、 $1.0 \times 10^6[\text{Gy}]$ という照射量を更新時期と考えることは妥当であると考える。2001年12月に更新したスーパーミラーについても、ガラス母材の材質及び幾何学的条件が同様であることから、今後すべての中性子導管をスーパーミラーに更新したとしても、本報告での検討結果は同様に適用できる。

今後は、 $\gamma$ 線の照射量に対するガラスの化学反応度特性への影響について調べ、その結果が静的疲労にどの程度の影響を及ぼすかについて詳しく調べる必要がある。また、静的疲労の影響は雰囲気中の水分量と比例することから、除湿設備等により中性子導管内の水分を限りなく無くすことによって、その影響も非常に少なくすることができると考えられる。

#### 謝辞

本報告書を作成するに当たり貴重な文献及び研究データの御提供並びに御指導頂いた、研究炉部研究炉利用課の鈴木正年氏、中性子科学研究センターの曾山和彦氏、また、終始御指導頂いた小林晋昇研究炉部長、中島照夫研究炉部次長、船山佳郎研究炉部 JRR-3 管理課長には、ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平成 12 年度研究炉部年報 JAERI-Review2001-048 研究炉部
- 2) 平成 13 年度弥生研究会  
「研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会」発表要旨集
- 3) JRR-3M 中性子導管の寿命評価試験 鈴木正年
- 4) ガラス工学ハンドブック 山根正之他  
1999 年 7 月 5 日 初版第 1 刷発行 朝倉書店
- 5) ガラスの物理 D.G.HOLLOWAY 大井喜久雄訳  
1978 年 3 月 20 日 初版第 2 刷発行 共立出版株式会社
- 6) ガラスハンドブック 作花済夫他  
1975 年 9 月 30 日 初版発行 朝倉書店
- 7) 機械工学便覧 基礎編 応用編 日本機械学会  
1990 年 5 月 31 日 新版 4 刷発行 日本機械学会
- 8) Journal of the American Ceramic Society Vol.66, No.5, 311  
W.A.ZDANIEWSKI, T.E.EASLER, and R.C.BRADT :  
Gamma Radiation Effects on the Strength of a Borosilicate Glass
- 9) 材料力学 (改訂版) 黒木剛司郎  
1993 年 2 月 15 日 改訂版第 13 刷発行 森北出版株式会社

付録A 長方形平板の一主軸まわりの曲げ<sup>9)</sup>

厚さ一定の長方形板が、その長軸または短軸のまわりに円筒状に曲げられる場合を考える。Fig.A-1において、板厚を二等分する中央平面を  $xy$  面に、それと垂直下方に  $z$  軸の正方向をとる。いま、図のように、 $y$  軸のまわりに板の縁に沿って単位長さあたり  $M$  の曲げモーメントを受け、円筒状に曲がるとすると変形の状況は、 $y$  軸の方向には一様であるから、単位幅の部分  $PQ$  をとって考えればよい。はりの曲げのときと同様に、 $PQ$  部分の  $yz$  面に平行な横断面は曲がった後も平面を保ち、 $x$  軸に平行な縦軸に直交すると仮定すれば、その中央平面から  $z$  の距離の  $x$  軸方向のひずみ  $\epsilon_x$  は、

$$\epsilon_x = z/\rho \quad (A. 1)$$

ここで、 $\rho$ ：中立面の曲率半径。

しかし、はりのときと異なり、 $y$  軸方向のはりの幅にあたる寸法が大きいので、その方向のひずみ  $\epsilon_y=0$  としてよい。また、 $\sigma_z=0$  であるから、つぎの関係式が成立する。

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_x = (\sigma_x - \nu \sigma_y) / E \\ \epsilon_y = (\sigma_y - \nu \sigma_x) / E = 0 \end{array} \right\} \quad (A. 2)$$

(A. 1)、(A. 2) の両式から、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = E \epsilon_x / (1 - \nu^2) = Ez/\rho (1 - \nu^2) \\ \sigma_y = \nu \sigma_x = \nu Ez/\rho (1 - \nu^2) \end{array} \right\} \quad (A. 3)$$

したがって、はりのときと異なり、幅の方向の応力  $\sigma_y$  が発生する。しかし、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  とともに  $z$  に比例して、直線的に変化する点ははりの場合と同様である。

次に、曲げモーメント  $M$  と応力とのつりあい条件を考えると、

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = E/\rho (1 - \nu^2) \int_{-h/2}^{h/2} z^2 dz = Eh^3/12\rho (1 - \nu^2)$$

ここで、

$$Eh^3/12(1 - \nu^2) = D \quad (A. 4)$$

とおくと、

$$M = D/\rho \quad \text{または} \quad 1/\rho = M/D \quad (A. 5)$$

式 (A. 5) を、はりの場合の式  $1/\rho = M/EI_z$  と比較すると、 $D$  ははりの曲げ剛性  $EI$  に

相当することがわかる。これを板の曲げ剛性という。この値ははりのときの  $1/(1-\nu^2)$ 倍になる。

式 (A. 5) を式 (A. 3) に代入すれば、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = 12zM/h^3 \\ \sigma_y = 12\nu zM/h^3 \end{array} \right\} \quad (A. 6)$$

曲げ応力最大値は、板の表面  $z=\pm h/2$  に生じ、

$$\left. \begin{array}{l} (\sigma_x)_{\max} = \pm 6M/h^2 \\ (\sigma_y)_{\max} = \pm 6\nu M/h^2 \end{array} \right\} \quad (A. 7)$$

となる。

なお、板のたわみ  $w$  や傾斜  $i$  は、はりのときと同様に、 $1/\rho = d^2w/dx^2$  とおけるので、これを式 (A. 5) に代入すれば、

$$D(d^2w/dx^2) = -M \quad (A. 8)$$

となる。

付録B 互いに直行する二方向への曲げ<sup>9)</sup>

長方形板がFig.B-1に示すように、直行するx、y座標軸まわりの二方向への曲げを受けるとする。それぞれの曲げモーメントを単位長さあたり  $M_x$ 、 $M_y$  とし、Fig.B-2に示すように、dyだけ離れた二つのyz面に平行な断面で構成される直方体を考える。曲げを受けた後も、この直方体の各側面は平面のままで、それぞれy軸、x軸に直交すると仮定すれば、中立面からzの距離における微小薄板pqrs部分のx、y方向のひずみ  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  は、

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon_x = z/\rho_x \\ \epsilon_y = z/\rho_y \end{array} \right\} \quad (\text{B. } 1)$$

ここで、 $\rho_x$ 、 $\rho_y$ はこの微小直方体の中立面のそれぞれxz面、yz面に平行な断面での曲率半径である。

一方、曲げ応力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  は、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = E(\epsilon_x + \nu \epsilon_y)/(1 - \nu^2) \\ \sigma_y = E(\epsilon_y + \nu \epsilon_x)/(1 - \nu^2) \end{array} \right\} \quad (\text{B. } 2)$$

であるから、これに式(B. 1)を代入し、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = Ez(1/\rho_x + \nu/\rho_y)/(1 - \nu^2) \\ \sigma_y = Ez(1/\rho_y + \nu/\rho_x)/(1 - \nu^2) \end{array} \right\} \quad (\text{B. } 3)$$

ここで、曲げモーメントと応力とのつりあいの式を作ると、

$$\begin{aligned} M_y dy &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dy dz = \{E(1/\rho_x + \nu/\rho_y)/(1 - \nu^2)\} dy \int_{-h/2}^{h/2} z^2 dz \\ &= \{Eh^3/12(1 - \nu^2)\} dy (1/\rho_x + \nu/\rho_y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_x dx &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dx dz = \{E(1/\rho_y + \nu/\rho_x)/(1 - \nu^2)\} dx \int_{-h/2}^{h/2} z^2 dz \\ &= \{Eh^3/12(1 - \nu^2)\} dx (1/\rho_y + \nu/\rho_x) \end{aligned}$$

これらの式に、板の曲げ剛性  $D=Eh^3/12(1-\nu^2)$  を代入して、

$$\left. \begin{array}{l} M_x = D(1/\rho_y + \nu/\rho_x) \\ M_y = D(1/\rho_x + \nu/\rho_y) \end{array} \right\} \quad (B. 4)$$

なお、たわみ  $w$  が微小なときは、

$$1/\rho_x = -\partial^2 w / \partial x^2, \quad 1/\rho_y = -\partial^2 w / \partial y^2$$

とおけるので、式 (B. 4) は、

$$\left. \begin{array}{l} M_x = -D(\partial^2 w / \partial y^2 + \nu \partial^2 w / \partial x^2) \\ M_y = -D(\partial^2 w / \partial x^2 + \nu \partial^2 w / \partial y^2) \end{array} \right\} \quad (B. 5)$$

となる。また、式 (B. 4) を式 (B. 3) に代入すると、

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = 12M_y z / h^3 \\ \sigma_y = 12M_x z / h^3 \end{array} \right\} \quad (B. 6)$$

となる。

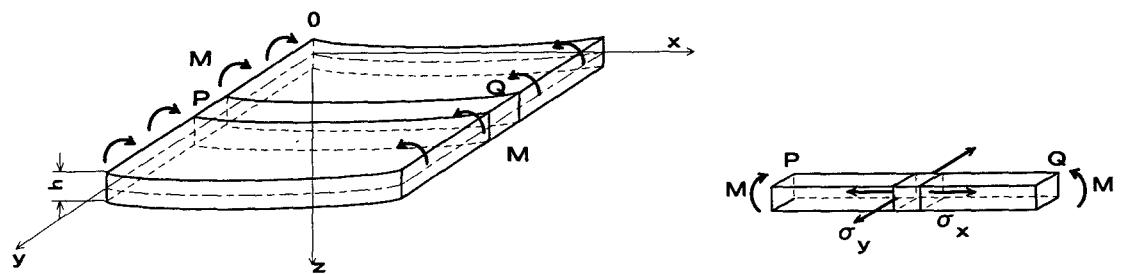


Fig. A - 1

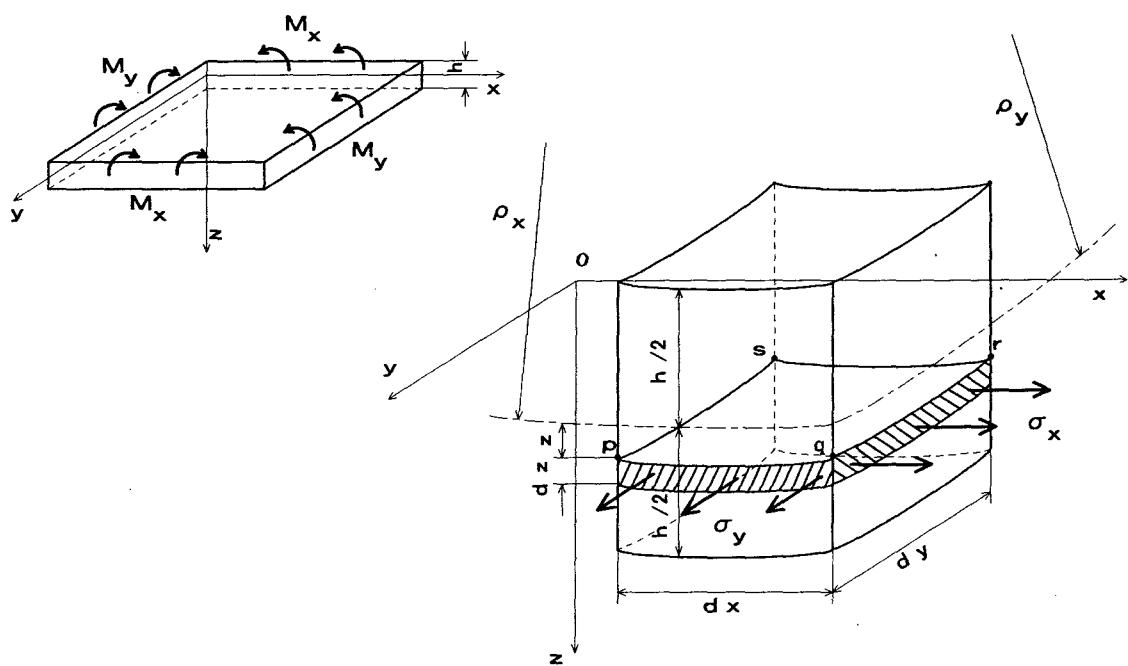


Fig. B - 1

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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
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	$N \cdot m$
功率, 放射束	ワット	W	$J/s$
電気量, 電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
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	$^\circ C$	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
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 =  $1.60218 \times 10^{-19} J$

1 u =  $1.66054 \times 10^{-27} kg$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 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。

3. 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。

4. 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  $1 Pa \cdot s = 10 P$ (ボアズ)(g/(cm·s))

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

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

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$	$= 4.184 J$ (熱化学)	
9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	$= 4.1855 J$ (15 °C)	
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	$= 4.1868 J$ (国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS (仏馬力)	
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	$= 75 kgf \cdot m/s$	
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	$= 735.499 W$	
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1	1	100	
$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
$2.58 \times 10^{-4}$	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

TEPCO-1974年子離乳食用紙の機械的強度に関する検討

R100

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています。