

JAERI-M
85-103

JRR-3改造炉中性子導管詳細設計(III)
JRR-3改造炉中性子導管性能評価のための
中性子収率解析

1985年8月

原見 太幹・鈴木 正年・植村 陸*

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

JAERI-M 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。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(Ⅲ)
JRR-3 改造炉中性子導管性能評価のための中性子収率解析

日本原子力研究所東海研究所研究炉管理部
原見太幹・鈴木正年・植村睦*

(1985年6月26日受理)

JRR-3 改造炉において、原子炉で発生した中性子を散乱実験等に供するため、熱中性子用導管2本及び冷中性子用導管3本を設置し、実験利用棟へ中性子を導く計画をしている。本報告で設置予定の導管の基本設計を述べ、設計データである導管の寸法、ニッケル薄膜厚さ、反射率等の導管中性子収率への影響をパラメトリックに行った解析結果を示した。この結果、接合誤差がない場合熱中性子導管で78% (3\AA 中性子) 冷中性子導管で69% (5\AA 中性子) の収率が見込まれることがわかった。

本解析用に開発したプログラムNEUGTを用いて接合誤差の収率への影響について検討した。
現設計に基づいて、導管出口スペクトル、導管内中性子空間分布、導管出口角度分布を算出した。

* コンピュータサービス(株)

Detailed Design of Neutron Guide Tubes at the Upgraded JRR-3 (III)

Neutron Transmission Analyses for a Performance Assessment
of the Neutron Guide Tubes

Taikan HARAMI, Masatoshi SUZUKI and Mutsumi UEMURA*

Department of Research Reactor Operation
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 26, 1985)

JRR-3, currently a heavy water moderated and cooled 10 MW reactor, is to be upgraded to a light water moderated and cooled, heavy water reflected 20 MW reactor.

Two guide tubes for thermal neutron and three for cold will be installed in the reactor to transport thermal and cold neutrons from the reactor hall to the experiment hall.

This reports the basic design data of the guide tubes and the sensitivity analyses of transmission on the parameters such as, size of tube, nickel layer thickness and reflectivity. The NEUGT program was developed to calculate the guide tube transmission.

The design assessment showed in the case of no abutment error that the T1 guide tube for thermal neutron, the C1 guide tube for cold and the C3 guide tube for cold are expected to have a transmission of 78 % (for 3\AA neutron) 69 % (for 5\AA neutron) and 62 % (for 7\AA neutron), respectively.

The analyses also showed the effect of abutment error on transmission and the spectra and the angular distribution at the exit of the guide tubes.

Keywords: JRR-3, Guide Tube, Cold Neutron, NEUGT Program, Transmission, Design Assessment

目 次

1.はじめに	1
2. JRR-3 改造炉中性子導管群の概要	1
2.1 概 要	1
2.2 中性子導管の基本設計データ	5
3. 中性子収率解析プログラム NEUGT	7
3.1 概 要	7
3.2 導管要素内の中性子伝播	7
3.3 導管要素間の中性子伝播	9
3.3.1 導管要素間の中性子軌跡	9
3.3.2 導管要素入口の中性子入射角度	11
4. NEUGTによるJRR-3 改造炉中性子導管設計評価	12
4.1 ニッケル薄膜厚さ	12
4.2 反射率	12
4.3 導管要素長さ	12
4.4 導管高さ	13
4.5 曲導管部長さ	13
4.6 導管巾	13
4.7 接合誤差	14
4.8 導管内気体による中性子損失	16
4.9 その他の中性子損失	16
4.10 設計評価のまとめ	17
5. 中性子分布	54
5.1 Maxwell 分布を仮定した導管出入口スペクトル	54
5.2 導管内中性子空間分布	54
5.3 導管出口中性子角度分布	55
6. 結 言	66
謝辞	66
参考文献	66

Content

1. Introduction	1
2. Description of the Neutron Guide Tube Group at the Upgraded JRR-3	1
2.1 General	1
2.2 Basic Design Data of the Neutron Guide Tubes	5
3. Description of the Neutron Transmission Program, NEUGT	7
3.1 General	7
3.2 Neutron Propagation in a Tube Element	7
3.3 Neutron propagation between Tube Elements	9
3.3.1 Neutron Trajectory between Tube Elements	9
3.3.2 Neutron Injection Angle at the Entrance of a Tube Element	11
4. Performance Assessment of the Neutron Guide Tube Design by NEUGT	12
4.1 Nickel Layer Thickness	12
4.2 Reflectivity	12
4.3 Tube Element Length	12
4.4 Tube Height	13
4.5 Length of a Curved Tube	13
4.6 Tube Width	13
4.7 Abutment Error	14
4.8 Neutron Loss due to Gases in a Guide Tube	16
4.9 Other Neutron Loss	16
4.10 Summary of the Performance Assessment of the Design	17
5. Neutron Distribution	54
5.1 Maxwellian Spectra at the Entrance and Exit of a Guide Tube	54
5.2 Neutron Space Distribution in a Guide Tube	54
5.3 Neutron Angular Distribution at the Exit of a Guide Tube ..	55
Acknowledgments	66
References	66

1. はじめに

現在、JRR-3炉を改造する計画が進められている。本研究炉の利用目的は、原子炉で発生した中性子を使って燃料・材料照射及びビーム実験を行うことである。本原子炉施設において、中性子をビーム実験に供するため、熱中性子用導管2本及び冷中性子用導管3本を設置し、実験利用棟へ中性子を導く計画をしている。

「中性子導管」は、中性子の全反射を利用して原子炉から実験装置のある場所まで、かなり離れた距離（数十メートル）をほとんど減衰なしに中性子を引き出すために用いるものである。

「中性子導管」の主な特徴は

- (1) 多数の導管を設置し、原子炉から離れた場所に適当な間隔で実験装置をおくことによって、原子炉の利用率を高めることができる。
- (2) 曲導管を用いることによって、熱外中性子、高速中性子およびガンマ線を著しく減少させることができる。
- (3) 曲導管の曲率半径を変えることによって、目的とする特性波長をもつ導管を設置することができる。即ち、特性波長より短波長側の中性子強度を減少させ、実験時邪魔になる $\frac{1}{2}$ の中性子をフィルターすることによって目的とする波長の中性子を得ることができる。

前報告において、われわれは、導管性能評価を行うためのプログラムNEUGTを開発し¹⁾、実測値との検証計算も行った²⁾。本報告で、JRR-3改造炉中性子導管群の設置計画を示し、導管の設計データである導管の寸法、ニッケル薄膜厚さ、反射率等の導管中性子収率への影響をNEUGTプログラムを用いてパラメトリックに解析した結果を示す。NEUGTが解析できる接合誤差の中性子収率への影響をも示す。

以下第二章にJRR-3改造炉中性子導管設置計画について述べ、第三章でNEUGTプログラムの概要を示す。第四章で設計データのパラメトリックな解析結果を示す。最後に第五章で解析結果の結言を述べる。

この報告書では中性子導管の遮蔽評価は行っていない。

2. JRR-3改造炉中性子導管群の概要

2.1 概 要

JRR-3改造炉では、中性子をビーム実験に供するため、熱中性子用導管2本及び冷中性子用導管3本、合計5本の中性子導管を設置し、実験利用棟(Beam Hall)へ中性子を導くことを計画している。図2.1-1にJRR-3改造炉に設置予定の中性子導管群を示す。原子炉生体遮蔽内からの中性子ビームの取出しは、水平実験孔8T(熱中性子用)及び9C(冷中性子用)を用いる。導管は、原子炉建家Guide Tunnelから実験利用棟Guide Tunnelを通って、実験利用棟内にのび、各管にいくつかの実験装置を配置し、中性子を分岐して用いる。

1. はじめに

現在、JRR-3炉を改造する計画が進められている。本研究炉の利用目的は、原子炉で発生した中性子を使って燃料・材料照射及びビーム実験を行うことである。本原子炉施設において、中性子をビーム実験に供するため、熱中性子用導管2本及び冷中性子用導管3本を設置し、実験利用棟へ中性子を導く計画にしている。

「中性子導管」は、中性子の全反射を利用して原子炉から実験装置のある場所まで、かなり離れた距離（数十メートル）をほとんど減衰なしに中性子を引き出すために用いるものである。

「中性子導管」の主な特徴は

- (1) 多数の導管を設置し、原子炉から離れた場所に適当な間隔で実験装置をおくことによって、原子炉の利用率を高めることができる。
- (2) 曲導管を用いることによって、熱外中性子、高速中性子およびガンマ線を著しく減少させることができる。
- (3) 曲導管の曲率半径を変えることによって、目的とする特性波長をもつ導管を設置することができる。即ち、特性波長より短波長側の中性子強度を減少させ、実験時邪魔になる $\frac{1}{2}$ の中性子をフィルターすることによって目的とする波長の中性子を得ることができる。

前報告において、われわれは、導管性能評価を行うためのプログラム NEUGT を開発し¹⁾、実測値との検証計算も行った²⁾。本報告で、JRR-3 改造炉中性子導管群の設置計画を示し、導管の設計データである導管の寸法、ニッケル薄膜厚さ、反射率等の導管中性子収率への影響をNEUGT プログラムを用いてパラメトリックに解析した結果を示す。NEUGT が解析できる接合誤差の中性子収率への影響をも示す。

以下第二章に JRR-3 改造炉中性子導管設置計画について述べ、第三章で NEUGT プログラムの概要を示す。第四章で設計データのパラメトリックな解析結果を示す。最後に第五章で解析結果の結言を述べる。

この報告書では中性子導管の遮蔽評価は行っていない。

2. JRR-3 改造炉中性子導管群の概要

2.1 概 要

JRR-3 改造炉では、中性子をビーム実験に供するため、熱中性子用導管2本及び冷中性子用導管3本、合計5本の中性子導管を設置し、実験利用棟 (Beam Hall)へ中性子を導くことを計画している。図 2.1-1 に JRR-3 改造炉に設置予定の中性子導管群を示す。原子炉生体遮蔽内からの中性子ビームの取出しは、水平実験孔 8 T (熱中性子用) 及び 9 C (冷中性子用) を用いる。導管は、原子炉建家 Guide Tunnel から実験利用棟 Guide Tunnel を通って、実験利用棟内にのび、各管にいくつかの実験装置を配置し、中性子を分岐して用いる。

中性子導管は、図 2.1-2 に示すように、導管、導管支持調整機構、遮蔽体、架台、真空ポンプ等から構成される。反射鏡は約 15 mm 厚さのホウケイ酸板ガラスに約 1000 Å 厚さのニッケルを蒸着したものである。導管は反射鏡を組み合わせて矩形断面（高さ約 20 cm, 巾 2 cm）内を中性子が伝播するようとする。導管の 1 要素当りの長さは、約 1 m でこれを 30 ~ 60 m 長さに連結設置する。導管内部は、真空 ($\sim 10^{-1}$ Torr) とする。

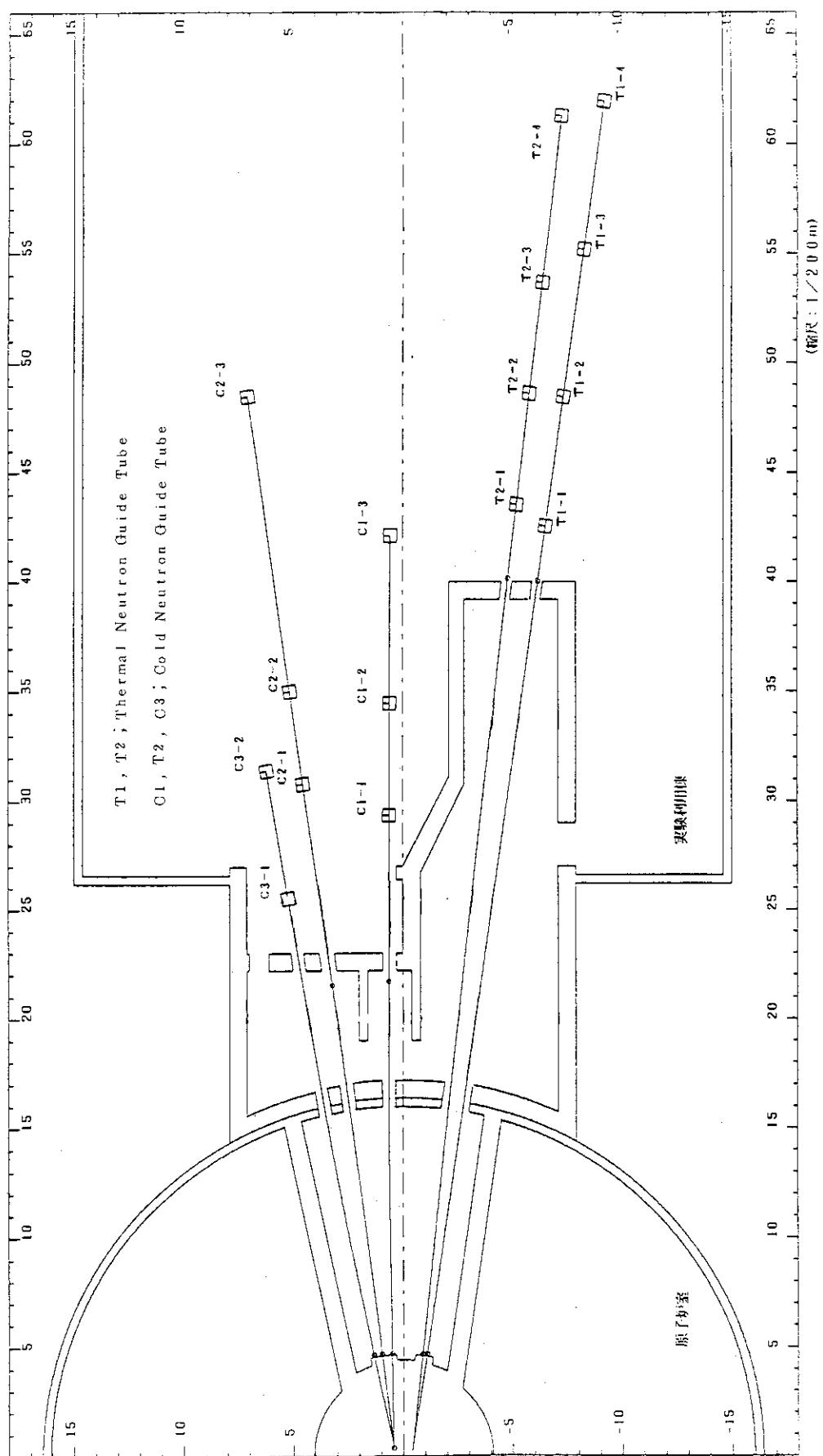


図 2.1 - 1 JRR-3 改造炉中性子導管群略図

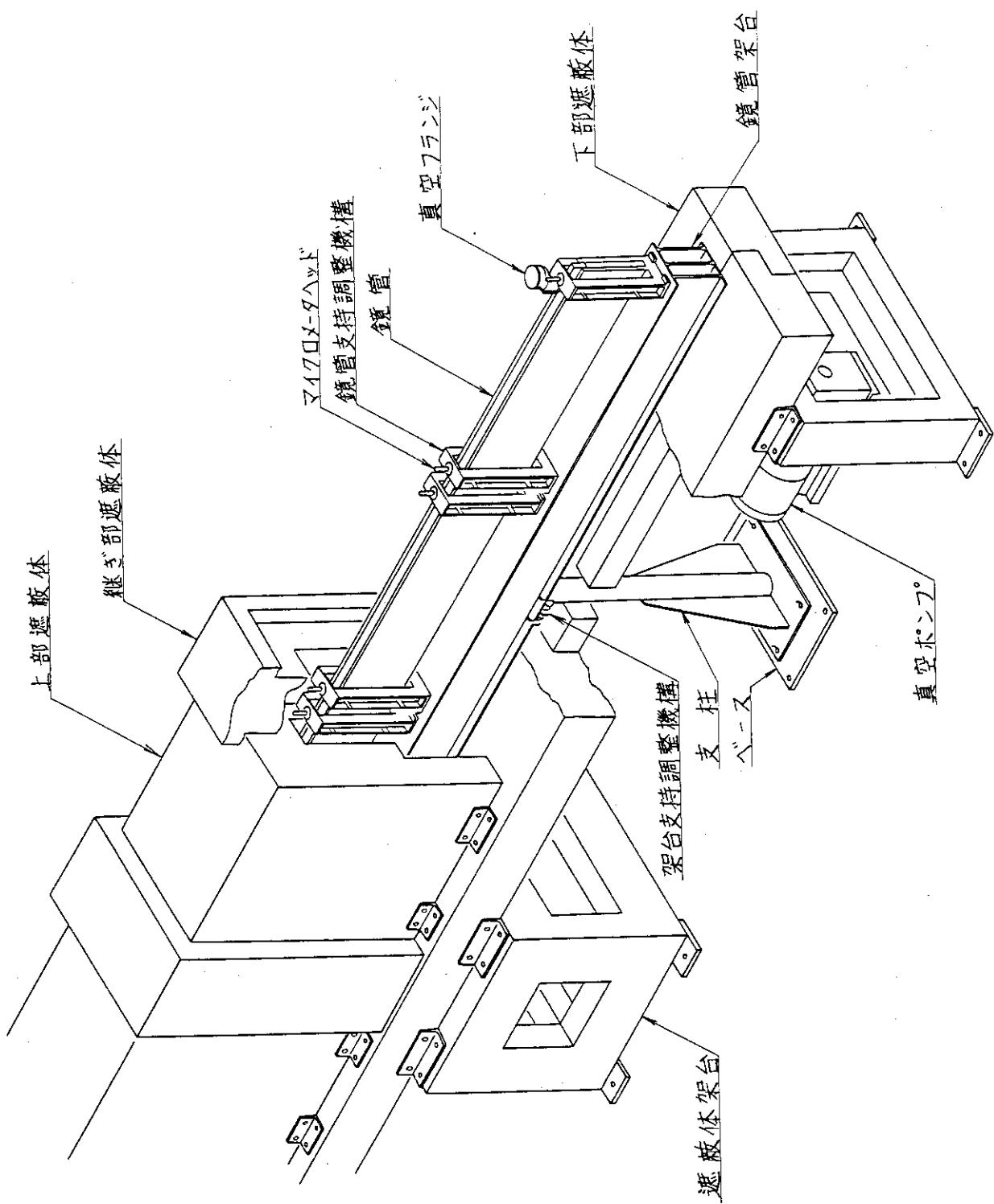


図 2.1-2 中性子導管, 真空図

2.2 中性子導管の基本設計データ

導管の特性は、その特性波長 (characteristic wave length) で決定され、ガーランド伝播だけで通りぬけることのできる最小の波長 λ^* で定義される。特性波長 λ^* は次式で定義される。

$$\sqrt{\frac{2a}{\rho}} = \lambda^* \sqrt{\frac{Nb_{coh}}{\pi}} \quad (2.2-1)$$

導管設計時、特性波長を決めるとき、導管巾 a と曲率半径 ρ は、(2.2-1) の関係がある。ここに N は単位体積当たりの原子核の数で b_{coh} は coherent な散乱半径を示す。ニッケルの場合

$$\sqrt{\frac{Nb_{coh}}{\pi}} = \frac{1}{578} \quad (\text{\AA}^{-1}) \quad (2.2-2)$$

となる。

導管の巾と高さは、中性子源の大きさ（冷中性子源の場合は、減速材容器の大きさ）、導管出口における中性子取り出し易さならびに導管設置場所の広さによって決められるが、反射が完全でないと、巾や高さが中性子収率に大きな影響を与える。

曲導管部の長さは、直接視距離 L^* の α 倍 ($1.1 \leq \alpha \leq 2.0$) をとることによって決まる。この範囲の α をとることによって短波長中性子を十分フィルターすることができる。 α を $1.1 \leq \alpha \leq 2.0$ の範囲で変えた時のフィルター効果の違いと中性子収率への影響は次章で述べる。曲導管に連がる直導管は、利用効率を上げるために設置される。

ニッケル薄膜厚さと反射鏡表面の凸凹は、反射率に大きな影響を与えるから、ニッケル薄膜厚さは十分厚く（約 1000 \AA 以上）、表面の凸凹は $\frac{\theta_g}{\theta_c} \lesssim 1.0 \times 10^{-2}$ なるようになめらかにする必要がある。ここに θ_c はニッケル反射鏡の中性子全反射臨界角で $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ラジアンの値である。

表 2.2-1 に JRR-3 改造炉中性子導管群の基本設計データを示す。次章でこの表を基礎として、各種設計データのパラメータ解析結果を示す。

表 2.2-1 JRR-3 改造炉中性子導管群基本設計データ

Beam Channel	8T		9C		
Guide Tube	T1	T2	C1	C2	C3
Total Length (m)	57.8	56.95	37.4	44.2	27.2
Bent Tube Length (m)	35.7	35.7	17.0	17.0	15.3
Curvature Radius (m)	3340	3340	835	835	371
Width (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Height (cm)	20.0	20.0	12.0	12.0	12.0
Total No. of Elements	68	67	44	52	32
Element No. of Bent Tube	42	42	20	20	18
Element Angle (Radian $\times 10^{-4}$)	2.54	2.54	10.2	10.2	22.9
(Degree $\times 10^{-2}$)	1.5	1.5	5.8	5.8	13.1
Characteristic Wavelength (\AA)	2.0	2.0	4.0	4.0	6.0
Temperature (K)	293	293	20	20	20

3. 中性子収率解析プログラム NEUGT

3.1 概要

実際に使われる中性子導管は、長さ約1mの直導管要素を連結したもので、曲管部は円周を多角形近似した円弧となる。この中性子導管の中性子収率を計算するためプログラムNEUGTを開発した。この章でこのプログラムの概略を述べる。詳細は文献1)を参照のこと。このプログラムは、導管要素間に接合誤差が生じた場合も解析できる。

中性子収率は、各導管要素内、要素間における中性子の軌跡を順次求めることによって得られる。中性子が消失するのは次の3つの場合である。

- (1) 反射面に入射する角度が臨界角より大きい場合
- (2) 反射面への入射角が臨界角より小さくても、反射率が1.0より小さい場合
- (3) 導管要素間にできた間隙から中性子が飛び出す場合

3.2 導管要素内の中性子伝播

導管要素の座標系を図3.2-1に示す。座標原点を入口断面中央とする。導管要素入口での中性子位置を(x_i, y_i)とする。軌跡のxzへの射影のz軸とのなす角を θ_x 、yz面への射影のz軸とのなす角を θ_y とする。(図3.2.2) 導管巾はd、高さをh、長さをlとする。

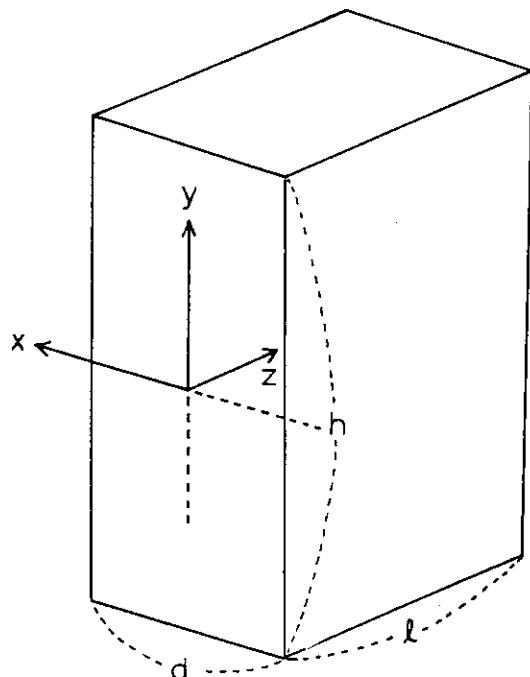


図3.2-1 導管要素の座標系

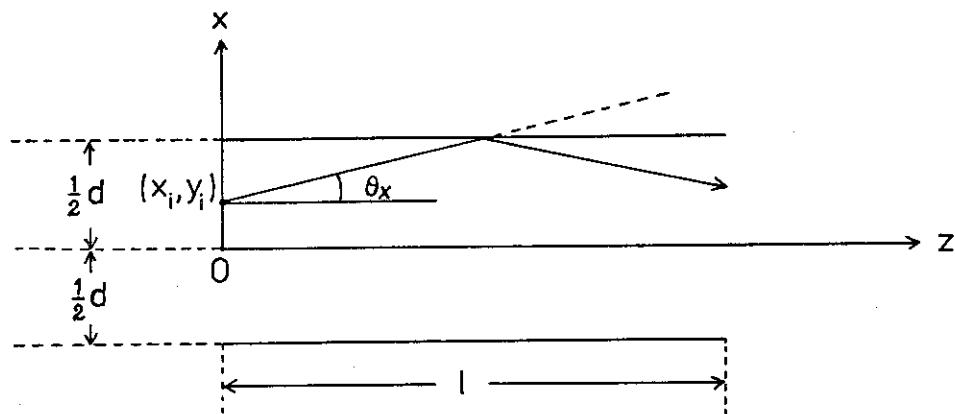


図 3.2-2 導管要素内の中性子伝播

導管要素内の中性子の軌跡の x 座標に注目し、導管要素内の x 方向反射面での衝突回数を N_x とする。

$$\left. \begin{array}{l} \theta = \theta_x \\ x = x_i + \ell \cdot \tan \theta_x \\ N_x = 0 \end{array} \right\} \quad (3.2-1)$$

とおくと、

(1) $-\frac{1}{2}d \leq x \leq \frac{1}{2}d$ の時、導管要素出口での中性子の位置、角度、衝突回数は、(3.2-1) で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2}d < x \text{ の時、中性子は、 } x \text{ の正の側の反射面で衝突し,} \\ x \rightarrow d - x \\ N_x \rightarrow N_x + 1 \\ \theta_x \rightarrow -\theta_x \end{array} \right\} \quad (3.2-2)$$

と変化する。

$$\left. \begin{array}{l} x < -\frac{1}{2}d \text{ の時、中性子は、 } x \text{ の負の側の反射面で衝突し,} \\ x \rightarrow -d - x \\ N_x \rightarrow N_x + 1 \\ \theta_x \rightarrow -\theta_x \end{array} \right\} \quad (3.2-3)$$

と変化する。

中性子軌跡の y 座標についても同様の計算を行い、各導管要素出口での中性子の位置 y、角度 θ_y 、衝突回数 N_y を求めることができる。

同一要素内で 2 回以上衝突する場合、(3.2-1) ~ (3.2-3) を繰り返し計算する。

導管要素入口での中性子強度を I_{in} とし、要素出口での中性子強度を I_{out} とすると、

$$I_{out} = I_{in} \times (R_{ref})^{N_x + N_y} \quad (3.2-4)$$

ここに R_{ref} は反射率である。 R_{ref} は反射面の材質、厚さ、中性子の波長、中性子の反射面への入

射角で決まる。反射率の与え方は、入力データによるもの、ニッケル薄膜無限大厚さの時の反射率の式（内臓）、ガラス上の有限厚さ（厚さを入力）のニッケルに対する反射率の式（内臓）の3通り可能である。

3.3 導管要素間の中性子伝播

この節で接合誤差の生じた導管要素間の中性子の軌跡を一般的に取扱える場合を述べておく。

3.3.1 導管要素間での中性子軌跡

導管要素 No. n の出口位置 Q_1 から出た中性子が、次の要素 No. n + 1 の入口矩形 $P_1 P_2 P_3 P_4$ 内に飛び込むかどうかを判定し、矩形 $P_1 P_2 P_3 P_4$ に入った場合、その入口位置 R を求める。（図 3.3-1）

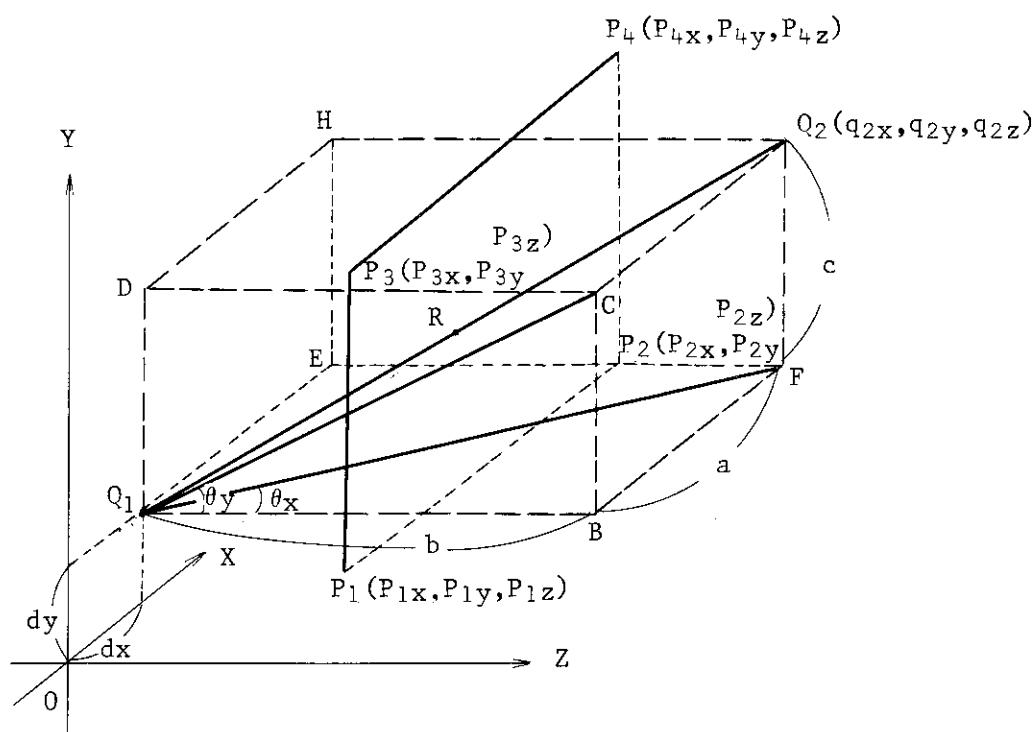


図 3.3-1 導管要素間の中性子軌跡

導管要素No.n の出口中心を座標の原点とする。中性子の進む方向にz 軸をとる。点Q₁の座標を(dx, dy, 0) とする。中性子の軌跡上に点Q₂をとり, $\angle FQ_1B = \theta_x$, $\angle CQ_1B = \theta_y$ とする。Q_x, Q_yは要素No.n の出口における中性子進行方向を示す。ここに $\overline{Q_1Q_2} = 1$ とする。

図3.2.2より

$$\left. \begin{array}{l} q_{2z} = a + dx \\ q_{2z} = c + dy \\ q_{2z} = b \end{array} \right\} \quad (3.3-1)$$

ここで

$$\begin{aligned} a &= q_{2z} \cdot \tan \theta_x \\ c &= q_{2z} \cdot \tan \theta_y \\ q_{2z} &= \sqrt{\frac{(1 - \sin^2 \theta_x)(1 - \sin^2 \theta_y)}{1 - \sin^2 \theta_x \cdot \sin^2 \theta_y}} \end{aligned} \quad (3.3-2)$$

次に3点 P₁(P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}), P₂(P_{2x}, P_{2y}, P_{2z}), P₃(P_{3x}, P_{3y}, P_{3z}) を通る矩形平面と直線 $\overline{Q_1Q_2}$ の交点R(r_x, r_y, r_z) を求める。

点P₁, P₂, P₃, Q₁, Q₂ の導管要素No.n の出口中心に対する位置ベクトルを $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3, \vec{Q}_1, \vec{Q}_2$ とすると、平面P₁P₂P₃P₄上の点 \vec{R} は

$$\vec{R} = \vec{P}_1 + (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) u + (\vec{P}_3 - \vec{P}_1) v \quad (3.3-3)$$

\vec{R} は直線 $\vec{Q}_1\vec{Q}_2$ 上の点であるから

$$\vec{R} = \vec{Q}_1 + (\vec{Q}_2 - \vec{Q}_1) t \quad (3.3-4)$$

と表わすことができる。

この平面P₁P₂P₃P₄と直線Q₁Q₂の交点Rが平面P₁P₂P₃P₄内であれば、中性子は次の導管要素No.n+1に入る。その条件は、

$$0 \leq u, v \leq 1 \quad (3.3-5)$$

である。

(3.3-3) (3.3-4) より

$$(\vec{P}_2 - \vec{P}_1) u + (\vec{P}_3 - \vec{P}_1) v + (\vec{Q}_1 - \vec{Q}_2) t = \vec{Q}_1 - \vec{P}_1 \quad (3.3-6)$$

この式から u, v, t を求める

$$D = \begin{vmatrix} p_{2x} - p_{1x} & p_{3x} - p_{1x} & q_{1x} - q_{2x} \\ p_{2y} - p_{1y} & p_{3y} - p_{1y} & q_{1y} - q_{2y} \\ p_{2z} - p_{1z} & p_{3z} - p_{1z} & q_{1z} - q_{2z} \end{vmatrix} \quad (3.3-7)$$

とおくと

(i) $\Delta = 0$ の場合

平面 $P_1 P_2 P_3 P_4$ と直線 $Q_1 Q_2$ は平行になり交点はない。

(ii) $\Delta \neq 0$ の場合

$$\left\{ \begin{array}{l} u = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} q_{1x} - p_{1x} & p_{3x} - p_{1x} & q_{1x} - q_{2x} \\ q_{1y} - p_{1y} & p_{3y} - p_{1y} & q_{1y} - q_{2y} \\ q_{1z} - p_{1z} & p_{3z} - p_{1z} & q_{1z} - q_{2z} \end{vmatrix} \\ v = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} p_{2x} - p_{1x} & q_{1x} - p_{1x} & q_{1x} - q_{2x} \\ p_{2y} - p_{1y} & q_{1y} - p_{1y} & q_{1y} - q_{2y} \\ p_{2z} - p_{1z} & q_{1z} - p_{1z} & q_{1z} - q_{2z} \end{vmatrix} \\ t = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} p_{2x} - p_{1x} & p_{3x} - p_{1x} & q_{1x} - p_{1x} \\ p_{2y} - p_{1y} & p_{3y} - p_{1y} & q_{1y} - p_{1y} \\ p_{2z} - p_{1z} & p_{3z} - p_{1z} & q_{1z} - p_{1z} \end{vmatrix} \end{array} \right. \quad (3.3-8)$$

ここで

a) $u, v < 0$ 又は $1 < u, v$ の場合

交点 R は平面 $P_1 P_2 P_3 P_4$ 内にない。

b) $0 \leq u, v \leq 1$ の場合

交点 R (r_x, r_y, r_z) は、次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} r_x = q_{1x} + (q_{2x} - q_{1x})t \\ r_y = q_{1y} + (q_{2y} - q_{1y})t \\ r_z = q_{1z} + (q_{2z} - q_{1z})t \end{array} \right. \quad (3.3-9)$$

導管要素間の中性子軌跡を無視した場合、導管要素 No. n 出口での中性子の座標 (x_n, y_n) と導管要素 No. n+1 入口での中性子の座標 (x_{n+1}, y_{n+1}) の間には、

$$x_{n+1} = x_n$$

$$y_{n+1} = y_n$$

の関係が成立つ。

3.3.2 導管要素入口での中性子入射角度

導管要素番号 n 出口の中性子出射角度を (θ_x^n, θ_y^n)、導管要素番号 n+1 における入口入射角度を ($\theta_x^{n+1}, \theta_y^{n+1}$) とすると、一般に

$$\left. \begin{array}{l} \theta_x^{n+1} = \theta_x^n + \alpha_x^n + \beta - \alpha_x^{n+1} \\ \theta_y^{n+1} = \theta_y^n \end{array} \right\} \quad (3.3-10)$$

ここに β は図 2.2-13 に示した要素間のなす角であり、 $\alpha_x^n, \alpha_x^{n+1}$ は、要素 n, n+1 における回転を伴う接合誤差の大きさである。

なお導管入口中性子入射角度は、中性子波長に対する臨界角以内とした。

4. NEUGTによるJRR-3改造炉中性子導管設計評価

4.1 ニッケル薄膜厚さ

文献 2) に示したように、ガラス板上に蒸着したニッケル薄膜厚さは、反射率に大きな影響を与える。図 4.1-1 にニッケル薄膜厚さと中性子反射率の関係を示す。ニッケル薄膜厚さが十分でないと、中性子がニッケル膜を貫通し、ガラス板に到達する。ガラス板による中性子全反射の臨界角は、ニッケルのそれより小さいから、ニッケル薄膜が薄いとニッケルによる全反射臨界角以内で中性子が入射したとしても反射率は 1.0 より小さくなる。例えば、ニッケル薄膜厚さが 100 \AA だとすると、ニッケルの臨界角で入射した場合、反射率は約 0.2 まで小さくなる。

この節でニッケル薄膜厚さが中性子収率にどのように影響を与えるかを調べる。反射率を与える式は、文献 2) の (2.3-4) (2.3-5) および (2.3-9) である。図 4.1-2 に結果を示す。図は、各導管の特性波長に対応する中性子の収率を示す。ニッケル薄膜厚さが 700 \AA あれば、収率を最大にすることができる。波長を変えた時、ニッケル薄膜厚さがどう影響するかを図 4.1-3 ~ 図 4.1-5 に示す。特性波長以外の波長では、 800 \AA と 1000 \AA でまだ少し差 (最大 3%) が出ている。ニッケル薄膜厚さが 1000 \AA あれば中性子損失を最小限 (1.0%以下) に抑えることができる。このことは文献 2) の図 2.3-4 で示したように、ニッケル薄膜厚さが 1000 \AA あると、中性子入射角が $0 \sim 0.98 \times (\theta_c)_{Ni}$ の広範囲で反射率が 0.99 以上になることによる。ニッケル薄膜が薄い時の例として 300 \AA の時の収率の波長依存性も図に示す。図 4.1-1 に示したように反射率が $\theta/\theta_c \geq 0.63$ の入射角で急に悪くなることを反映して数 10% の収率減少に到る。

4.2 反射率

前節でニッケル薄膜厚さが中性子収率に及ぼす影響を示したが、不完全な反射の原因としてニッケル薄膜厚さばかりでなく、反射鏡表面の macroscopic な欠陥が考えられる (文献 2) の 2.3 節)。この節で原因はともあれ、反射率が収率に与える影響を解析する。図 4.2-1 に 0.9 ~ 1.0 の間での反射率を変えた時、特性波長の中性子に対する収率がどう変わかるかを示している。反射率を 0.99 とすると、完全反射の場合に対し収率の減少を 3 ~ 5% に抑えることができる。波長を変えた時の収率の変化を図 4.2-2 ~ 図 4.2-4 に示す。反射率の収率への影響は、反射回数で決まる。反射回数は、導管への入射角度によるが、特性波長より長波長側ではジグザグ伝播となり反射回数も増え、反射率 $R < 1.0$ では長波長ほど収率が減少する。

4.3 導管要素長さ

導管要素長さの収率への影響は、円弧を多角形近似したことによる影響である。理想的な円弧

の導管の収率は、文献 2) の 2.2.2 節で示したが、各導管の理想的円弧の場合（かつ反射率 = 1.0）の収率を図 4.3-1～図 4.3-3 に示す。各導管の特性波長での収率は $2/3$ である。JRR-3 改造炉中性子導管の導管要素長さの収率への影響を図 4.3-4 に示す。波長は特性波長である。要素長さを長くすると理想的円弧からのずれが大きくなり収率が下がることがわかる。この影響は、曲率半径の小さい C 3 導管で大きい。図 4.3-5～図 4.3-7 に各導管の収率の波長依存性を示す。要素長さが長くなると、収率の波長依存性が複雑になることがわかる。85 cm 要素長さを用いて多角形近似することによって、T 1 導管で $1 \sim 2\%$ 、C 1 導管で $2 \sim 3\%$ 、C 3 導管で $8 \sim 9\%$ 中性子収率が減少することがわかる。

4.4 導管高さ

導管要素高さは、導管の上下部反射面での反射回数に影響し、反射率が完全でないと、収率が低下する。反射率を 0.98 として要素高さが収率にどのように影響するかを解析した。結果を図 4.4-1～図 4.4-4 に示す。特性波長では高さを $4 \sim 24\text{ cm}$ に変えても収率への影響はほとんどない。特性波長より長波長側では高さを 4 cm のように低くすると収率が顕著に低下していく。高さを 12 cm 以上にすると中性子損失を $1 \sim 2\%$ に抑えることができる。

4.5 曲導管部長さ

第 1 章の「はじめに」で、「中性子導管」の特徴の 1 つとして、特性波長より短波長側の中性子をフィルターする効果があることを述べた。この節で数値計算で得たフィルタ効果を示す。各導管について曲管部の長さを変えた時、各波長の中性子収率がどのように変化するかを図 4.5-1～図 4.5-3 に示した。この解析においては曲導管部に続く直導管は省いている。横軸は、直接視距離 L^* に対する曲導管の長さの比である。 $L/L^* \geq 1.0$ で、特性波長より短波長側の中性子の収率が小さくなるのがわかる。 $1.0 < \alpha < 2.0$ においては、収率とフィルター効果ともほとんど差はない。

4.6 導管巾

表 4.6-1 に導管巾を 1.0 、 2.0 および 3.0 cm とした時の導管の寸法を示す。曲管部の長さを直接視距離の 1.5 倍にした。C 3 導管について $L/L^* = 2.0$ にした時の寸法も入れている。収率計算は反射率 $R = 1.0$ の場合と 0.98 の場合について行った。結果を図 4.6-1 と図 4.6-2 に示す。波長は各導管の特性波長である。2 つの図から反射率の違いによって、導管巾が収率に与える影響はほとんど変わらない。導管巾を狭くすると収率が悪くなる。特に C 3 導管がその影響が大きく出ている。本解析においては、導管要素長さを 85 cm 一定にしているので、C 3 導管のように曲率半径が小さくなると中性子損失が大きくなる。これは理想的な円弧からのずれが大きくなるからである。ただし導管巾を狭くした場合も、これに応じて導管要素の長さを短かくすれば収率は回復する。このことは 4.5 節の議論からも理解できる。

表 4.6-1 からわかるように、導管巾は、導管全体の大きさを決めるので実験利用棟のスペースと相まって決める必要がある。

4.7 接合誤差

中性子導管は導管要素をつなぎ合わせて作られる。よって据え付け時の接合誤差が中性子を損失させる原因となる。プログラム NEUGT で計算できる接合誤差の種類を表 4.7-1 に示す。この節で、JRR-3 改造炉中性子導管における接合誤差の中性子収率への影響を調べる実際の接合誤差はいろいろな型の誤差が複雑に組み合わさったものであるが、ここでは簡単に、正しく位置している要素で狭まれたある 1 つの導管要素が接合誤差を起こしたとする。この場合、表 4.7-1 の 6 種類の接合誤差のうち起こりうる誤差は、A, B と C である。D, E, F の場合各要素は前後の要素によって束縛され誤差を生じない。誤差が生じた場所を曲導管、直導管にそれぞれ 3ヶ所ずつとて解析をした。それぞれの位置を図 4.7-1 に×で示す。以下、T 1 導管、C 1 導管、C 3 導管に A, B, C 型接合誤差を発生させた時、収率がどれだけ影響を受けるかを示す。A, B 型誤差は要素の回転であり、C 型誤差は導管巾方向平行移動である。

4.7.1 T 1 導管

曲導管部（要素番号 2, 21, 41）に A 型接合誤差（-0.008 度および -0.015 度の回転）を発生させた時の収率変化を図 4.7-2 と図 4.7-3 に示す。曲導管部（要素番号 2, 21, 41）に B 型接合誤差（+0.008 度および +0.015 度の回転）を発生させた時の収率変化を図 4.7-4 と図 4.7-5 に示す。±0.015 度は最大の誤差で、収率の減少は波長によっても異なるが最大で約 3.0 % におさまる。

曲導管部（要素番号 2, 21, 41）に C 型接合誤差（±1.0 mm 導管巾方向平行移動）が生じた時の収率変化を図 4.7-6 に示す。±1.0 mm 誤差で最大約 10 % の収率低下となる。収率の低下は接合誤差発生場所によらず、ほど同じ影響を受けることがわかる。要素番号 21 により小さな C 型接合誤差（±0.2 ~ ±0.8 mm）を発生させた時の収率変化を図 4.7-7 と図 4.7-8 に示す。導管全体で 1 つの要素のみに平行移動誤差が生じたとして平行移動量が±0.4 mm の時、収率は約 5.0 % 低下することになる。

直導管部（要素番号 43, 54, 66）に C 型接合誤差（±1.0 mm 平行移動）が生じた時の収率変化を図 4.7-9 に示す。曲導管部に C 型接合誤差が発した時ほど同じ傾向を示すが、波長によっては曲導管部の場合より収率が悪くなる場合もある。

T 1 導管の全要素数は 68 と設計されている（表 2.2-1）。据え付け精度を~0.05 mm とする（文献 3）では、誤差に Gauss 分布を仮定して接合誤差による収率低下を評価する式として

$$\frac{L \cdot h}{\ell_0 \cdot d \sqrt{\pi}} \times 100 (\%) \quad (4.7-1)$$

を与えていた。

この式で L (導管全長) = 57.8 m, ℓ_0 (要素長さ) = 0.85 m, d (導管巾) = 20.0 mm, h (接合

誤差) = 0.05 mm とすると、上式から 9.6 %となる。

4.7.2 C 1 導管

曲導管部(要素番号 2, 10, 19)に A型接合誤差(−0.058 度および −0.029 度の回転)を発生させた時の収率変化を図 4.7-10, 図 4.7-11 に示す。曲導管部(要素番号 2, 10, 19)に B型接合誤差(+0.058 度および 0.029 度の回転)を発生させた時の収率変化を図 4.7-12, 図 4.7-13 に示す。±0.058 度は、最大の回転誤差であり、収率の減少は波長によって異なるが最大で約 6.0 %に達する。

曲導管部(要素番号 2, 10, 19)に C型接合誤差(±1.0 mm 導管巾方向平行移動)が生じた時の収率変化を図 4.7-14 に示す。±1.0 mm 誤差で最大約 10 %の収率低下となり T 1 導管の場合とほぼ同じである。接合誤差の発生場所による違いは最大 8 ~ 9 %である。要素番号 10 により小さな C型接合誤差(±0.2 ~ ±0.8 mm)を発生させた時の収率変化を図 4.7-15 と図 4.7-16 に示す。導管全体で 1 つの要素のみに平行移動誤差が生じたとして平行移動量が±0.5 mm であると収率が約 5 %減少することになる。

直導管部(要素番号 21, 32, 43)に C型接合誤差(±1.0 mm 平行移動)が生じた時の収率変化を図 4.7-17 に示す。曲導管部に C型接合誤差が生じた時とほぼ同じ傾向を示す。

C 1 導管の全要素数は 44 と設計されている(表 2.2-1)。据え付け精度を~0.05 mm とすると、T 1 導管で行ったと同じ評価式(4.7-1)を用いた場合、L(導管全長)=37.4 m とすると、収率低下は 6.2 %となる。

4.7.3 C 3 導管

曲導管部(要素番号 2, 9, 17)に A型接合誤差(−0.066 度および −0.131 度の回転)が生じた時の収率変化を図 4.7-18 と図 4.7-19 に示す。曲導管部(要素番号 2, 9, 17)に B型接合誤差(+0.066 度および +0.131 度の回転)が生じた時の収率変化を図 4.7-20 と図 4.7-21 に示す。±0.131 度は最大の誤差であり、収率の減少は波長によって異なるが、最大約 12 %にも達する。±0.065 度の回転誤差が生じた場合、最大約 7 %である。

曲導管部(要素番号 2, 9, 17)に C型接合誤差(±1.0 mm 導管巾方向平行移動)が生じた時の収率変化を図 4.7-22 に示す。±1.0 mm 誤差で最大約 10 %の収率低下となる。収率の低下は接合誤差発生場所によらず、ほぼ同じ影響を受けることがわかる。要素番号 9 に 1.0 mm 以下の C型接合誤差(±0.2 ~ ±0.8 mm)を発生させた時の収率変化を図 4.7-23 と図 4.7-24 に示す。導管全体で 1 つの要素だけに平行移動誤差が生じたとして平行移動量が±0.4 mm であると、収率が約 5 %減少することになる。

直導管部(要素番号 19, 25, 31)に C型接合誤差(±1.0 mm 平行移動)が生じた時の収率変化を図 4.7-25 に示す。曲導管部に C型接合誤差が生じた時とほぼ同じ傾向を示す。

C 3 導管の全要素数は 32 を設計されている(表 2.2-1)。据え付け精度を~0.05 mm とし式(4.7-1)を用いて、接合誤差に Gauss 分布を持たせた場合、L(導管全長)=27.2 m とすると、収率低下を 4.5 %と評価することができる。

4.8 導管内気体による中性子損失

この節で導管内気体による中性子損失量を評価する。この節と次節において中性子が物質と何らかの相互作用があると中性子は損失すると仮定する。(これは損失量としては過大評価することになる) 気体としては、1気圧のHeガスまたは減圧した空気を考える。長さLの導管に I_i の強度で入射した中性子が I_o で出ていくとすると、(図4.8-1)

$$I_o = I_i e^{-\mu L} \quad (4.8-1)$$

ここに $\mu = n \sigma$ n は気体数密度、 σ は中性子の気体に対する全断面積である。気体の状態方程式より、 $n = P N_A / RT$ (P :圧力、 N_A :アボガドロ数、 R :気体定数、 T :温度) だから

$$\mu = \frac{P N_A \sigma}{RT} \quad (4.8-2)$$

全断面積 σ は文献4)より、各気体に対し熱中性子から冷中性子領域の中性子全断面積を図4.8-2に示す。温度 $T = 293$ K とすると $\mu \sim 2.5 \times 10^{-5} P \sigma (\text{cm}^{-1})$ となる。ここに P はatmosphere, σ はbarnの単位である。Heの場合 1 atm, 空気の場合圧力を変えて中性子の減少率 $\frac{I_i - I_o}{I_i} = 1 - e^{-\mu L}$ を表2.5-1に示す。ヘリウムを封入すると約15%程度の中性子損失があるから、ヘリウム封入はできない。空気の場合、真空度を 4.0×10^{-3} atm にすると、中性子損失を1%程度に抑えることができる。

4.9 その他の中性子損失

導管を中性子が通過する時、導管出入口のAl又はZrのフランジ窓において中性子が損失する。また、原子炉炉室外側のビームシャッター設置部において大気圧の空气中を貫通する。フランジ窓に使うAlまたはZrの使用厚さ、および空气中を通過する距離は設計中である。ここでは、それぞれの厚さ、距離が収率にどれだけ影響するかを評価しておく。

図4.9-1に示すように0.01eV以下の中性子で全断面積はエネルギーによって異なるが最大値はAlに対し約3.0 barn, Zrに対し約6.0 barnである。⁴⁾ここではこの最大断面積で中性子損失を評価しておく。Al, Zrの密度はそれぞれ 2.69 g/cm^3 および 6.53 g/cm^3 である。⁵⁾ 原子量はAlで26.98, Zrで91.22である。⁵⁾ Alの全厚さを L_{Al} , Zrの全厚さを L_{Zr} とすると、中性子損失はそれぞれ次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & 1 - \exp \left\{ - \frac{2.69 \times 6.023 \times 10^{23}}{26.98} \times 3.0 \times 10^{-24} \times L_{Al} \right\} \text{ for Al} \\ &= 1 - \exp \left\{ - 0.180 L_{Al} \right\} \\ & 1 - \exp \left\{ - \frac{6.53 \times 6.023 \times 10^{23}}{91.22} \times 6.0 \times 10^{-24} \times L_{Zr} \right\} \text{ for Zr} \\ &= 1 - \exp \left\{ - 0.259 L_{Zr} \right\} \end{aligned}$$

1.0 mm ~ 10 mm の間の厚さに対する中性子損失を表 4.9-1 に示す。大気圧の空気については、 $\sigma = 20 \text{ barn}$ (表 4.8-1) とすると、 $\mu \sim 50 \times 10^{-5} (\text{cm}^{-1})$ 。式 (4.8-1) より中性子損失が計算され、結果を表 4.9-1 に示す。

水蒸気の中性子損失について評価しておく。中性子の水による断面積は水分子中の水素によってほど決まる。図 4.9-2 に水中の水素による中性子全断面積を示す。⁴⁾ 熱中性子から冷中性子へと中性子エネルギーが下がるにつれて全断面積が大きくなる。中性子エネルギーが $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ eV}$ の範囲で全断面積は最大約 200 バーンである。40 °C の水蒸気圧は約 0.073 atm である。40 °C の大気が湿度 x % の水蒸気で満されているとすると、式 (4.8-2) より $\mu \sim 3.65 \times 10^{-6} (\text{cm}^{-1})$ である。水蒸気による中性子損失を表にしたのが表 4.9-2 である。70 cm 厚さの層で湿度が 90 % でも損失は約 2 % である。

真空容器の実験孔入口 (Aℓ 窓) との間に 1 ~ 2 mm の D₂₀ 層がある。D₂₀ 層による中性子損失を評価しておく。図 4.9-3 に重水中の水素の中性子全断面積を示す。⁴⁾ $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ eV}$ 領域で全断面積最大は約 23 バーン。図 4.8-2 より酸素の全断面積の最大値は約 10 バーン。よって、 $\sigma = 23 + 10 = 23 \text{ barn}$ とし、293 K の重水密度を 1 g/cm^3 とすると、 $\mu \sim 0.77 (\text{cm}^{-1})$ 重水層の厚さによる中性子損失を表 4.9-3 に示す。1 mm の重水層で約 7 % の損失が評価される。

4.10 設計評価のまとめ

以上各種設計データについてパラメータ解析を行った結果、表 2.2-1 の設計データを用いた時の中性子損失をまとめると、表 4.10-1 のようになる。ここで反射率を 0.99 としている。理想的円弧の場合の収率から中性子損失量を差引いて収率期待値を求めた。収率期待値は接合誤差を考慮した場合としない場合で、値に巾ができるが、表より T 1 導管 (3 Å 中性子) で 68 ~ 78 %, C 1 導管 (5 Å 中性子) で 63 ~ 69 %, C 3 導管 (7 Å 中性子) で 58 ~ 62 % となる。たゞしここでは、4.9 のその他の中性子損失で述べた損失量は含まれていない。

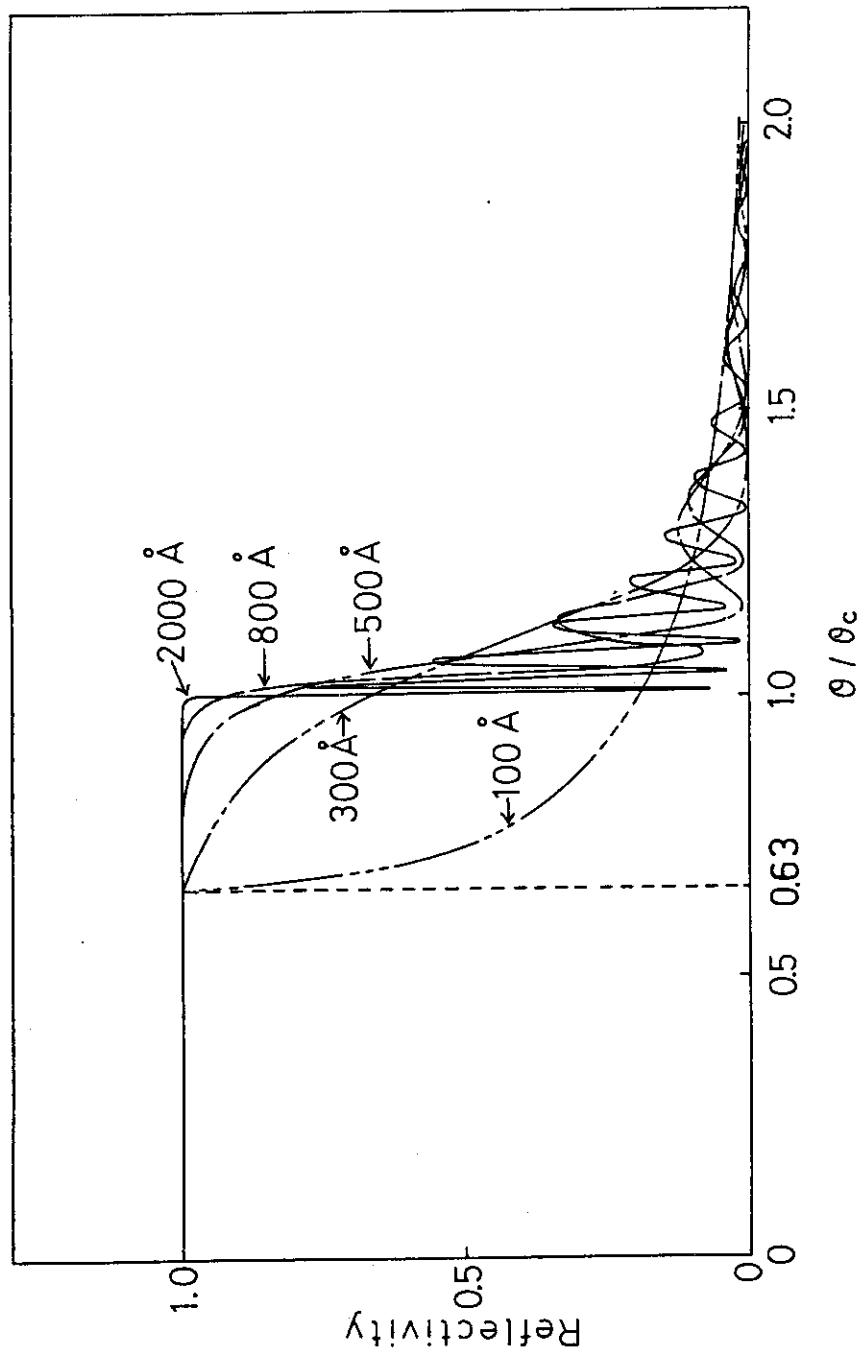


図 4.1-1 ガラス上に蒸着したニッケル薄膜による中性子反射率と θ / θ_c の関係
(θ : 入射角, θ_c : 階界角)

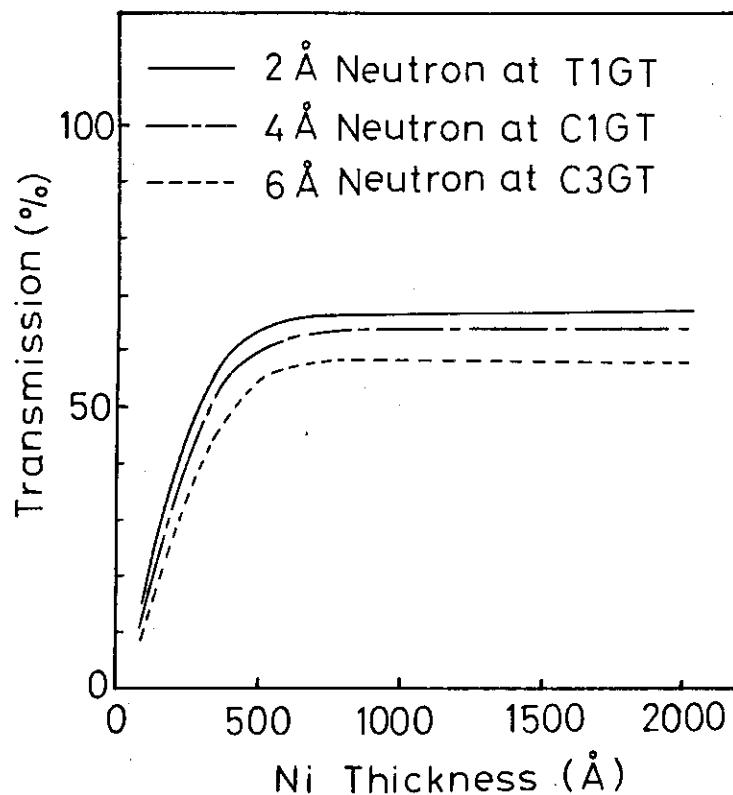
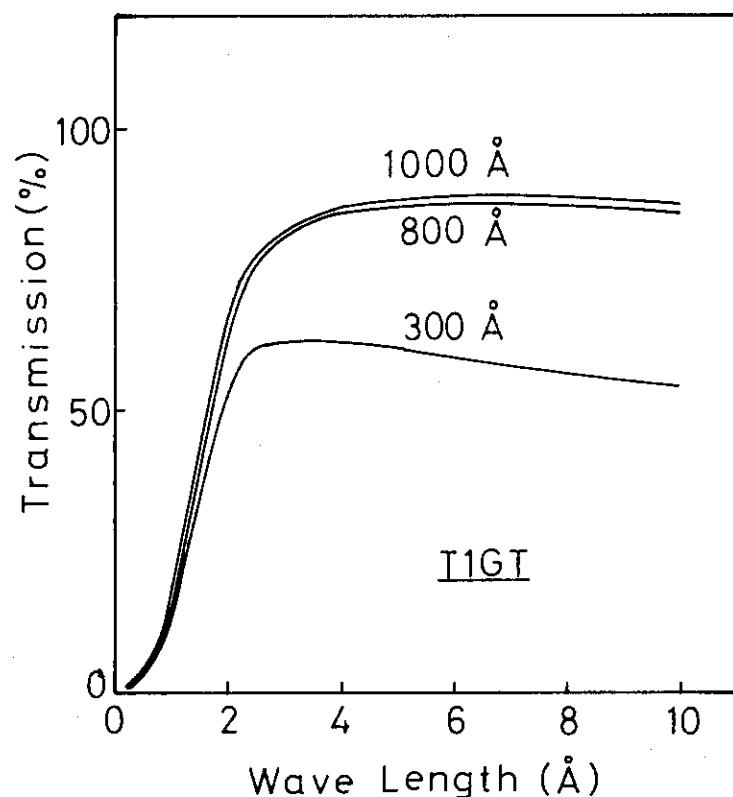


図 4.1-2 ニッケル薄膜厚さの収率への影響

図 4.1-3 ニッケル薄膜厚さの収率への影響
(T1 導管)

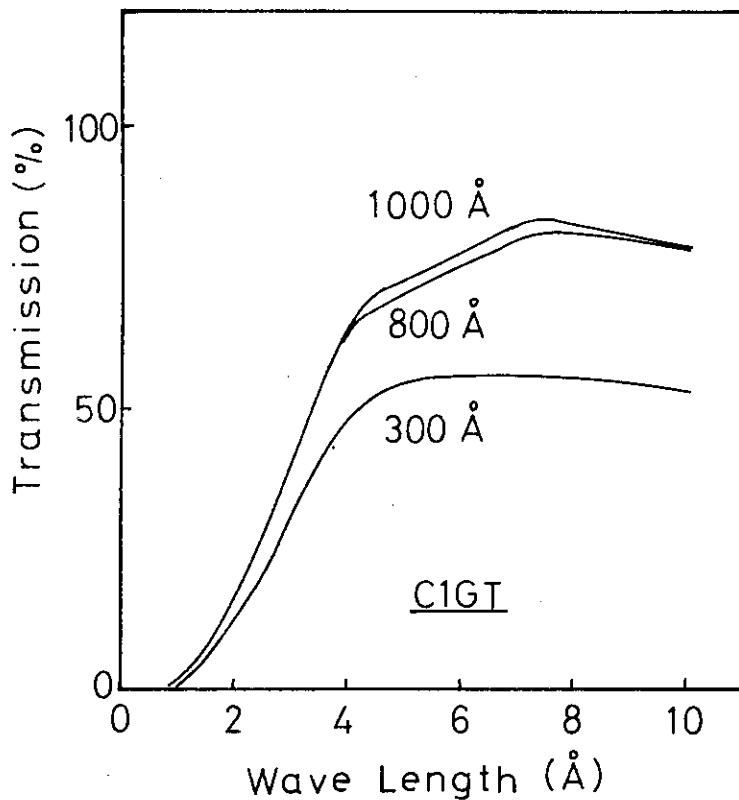


図 4.1-4 ニッケル薄膜厚さの収率への影響
(C 1 導管)

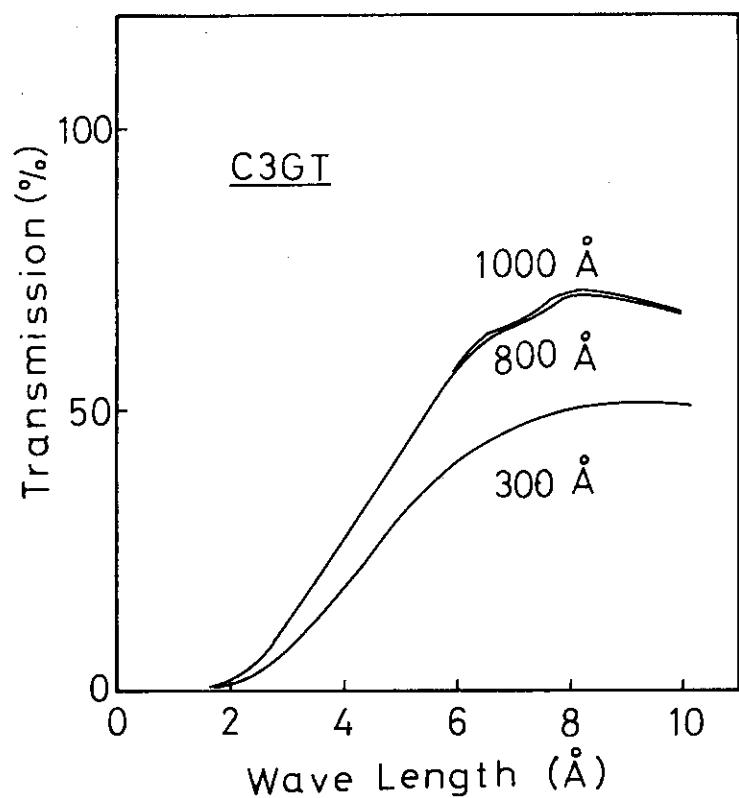


図 4.1-5 ニッケル薄膜厚さの収率への影響
(C 3 導管)

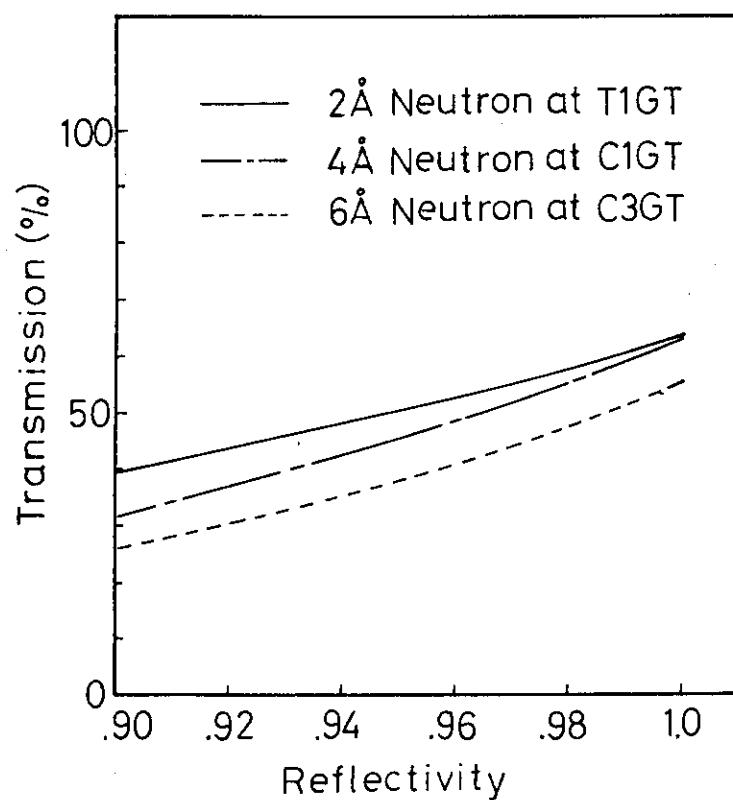
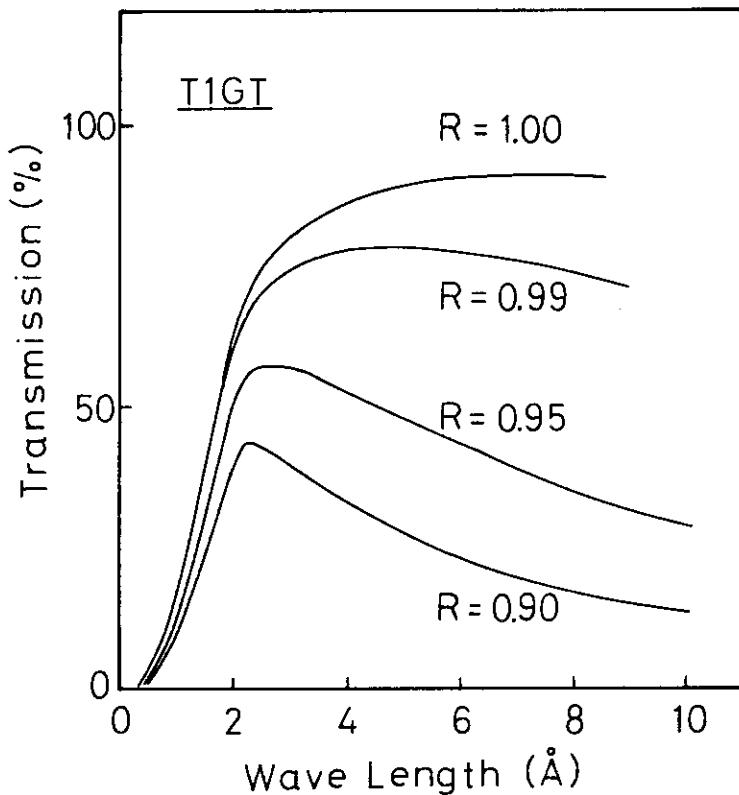


図 4.2-1 反射率の収率への影響

図 4.2-2 反射率 (R) の収率への影響
(T 1 導管)

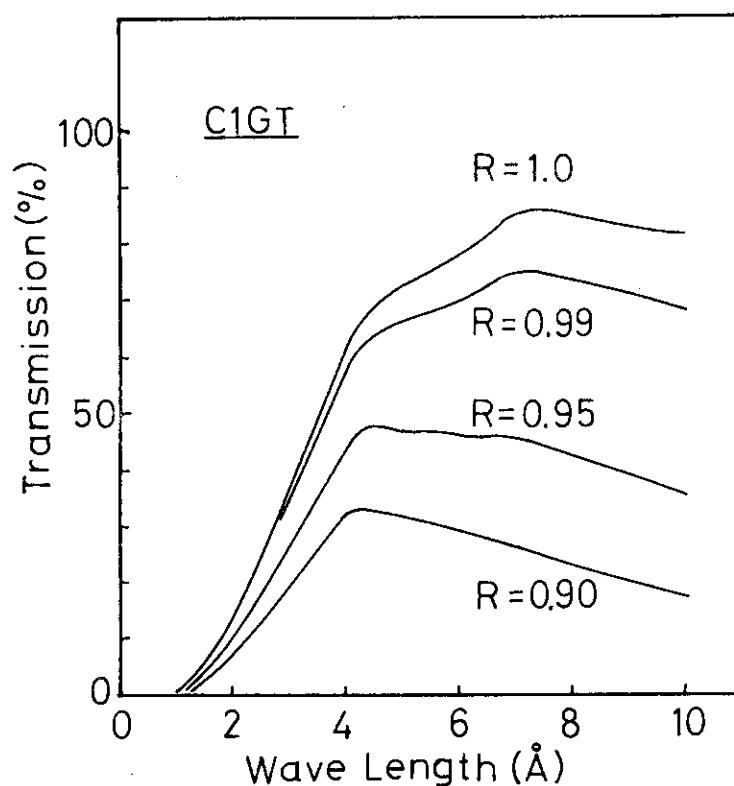


図 4.2-3 反射率 (R) の収率への影響
(C 1 導管)

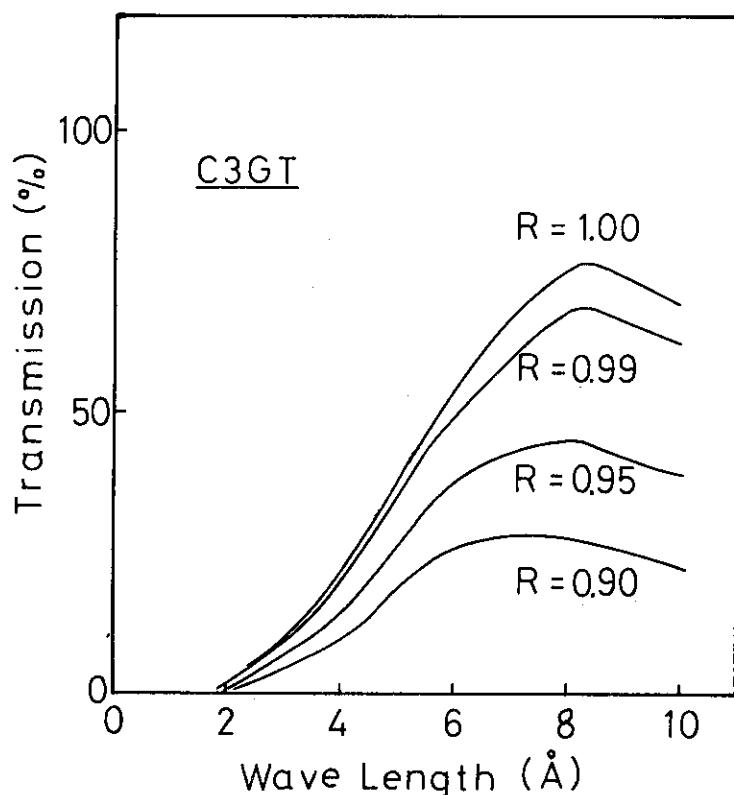


図 4.2-4 反射率 (R) の収率への影響
(C 3 導管)

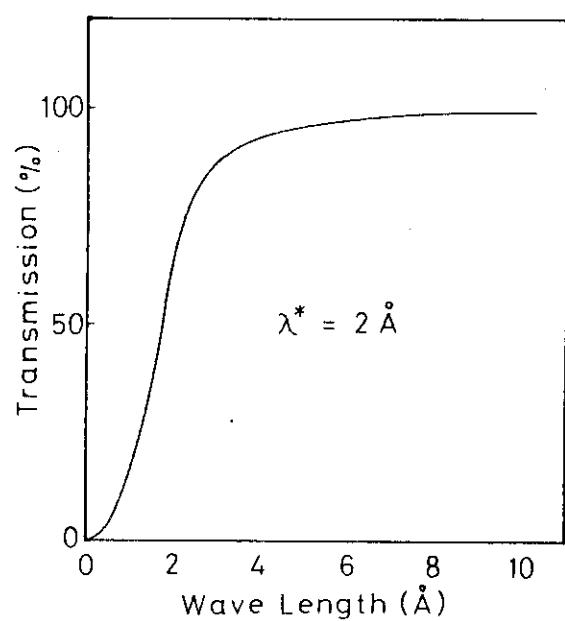


図 4.3-1 理想的円弧導管の収率
(T 1 導管)

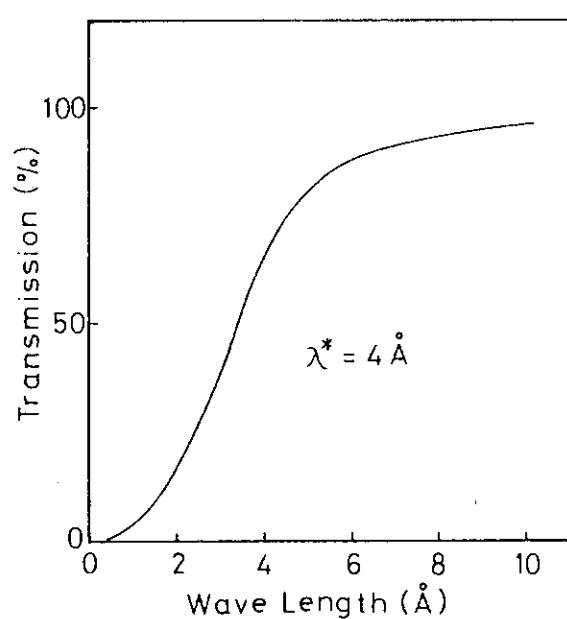


図 4.3-2 理想的円弧導管の収率
(C 1 導管)

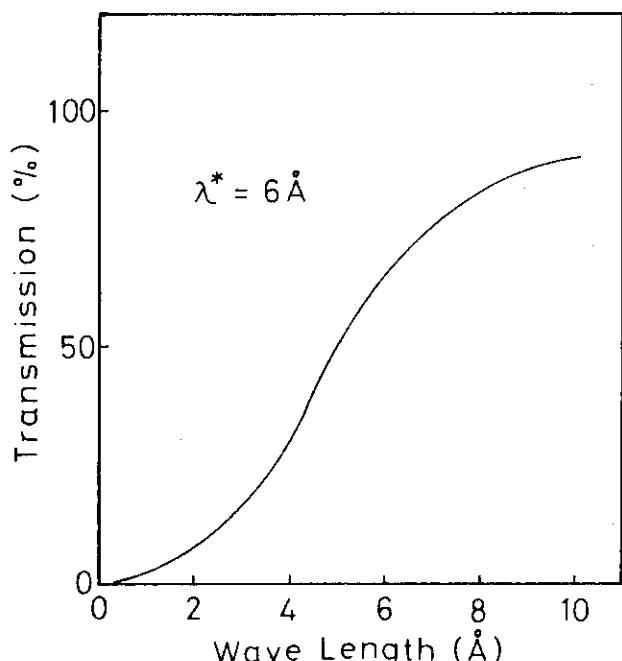


図 4.3-3 理想的円弧導管の収率
(C 3 導管)

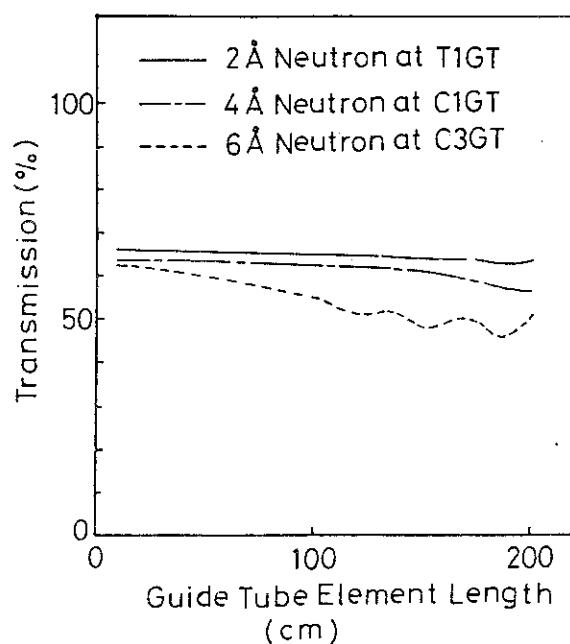
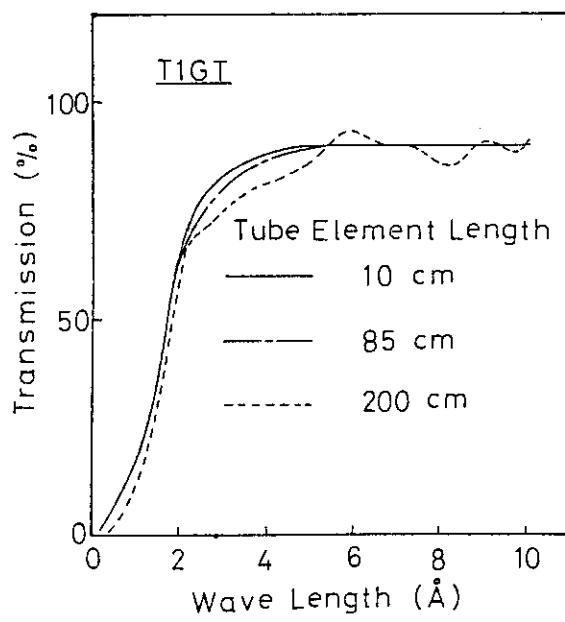
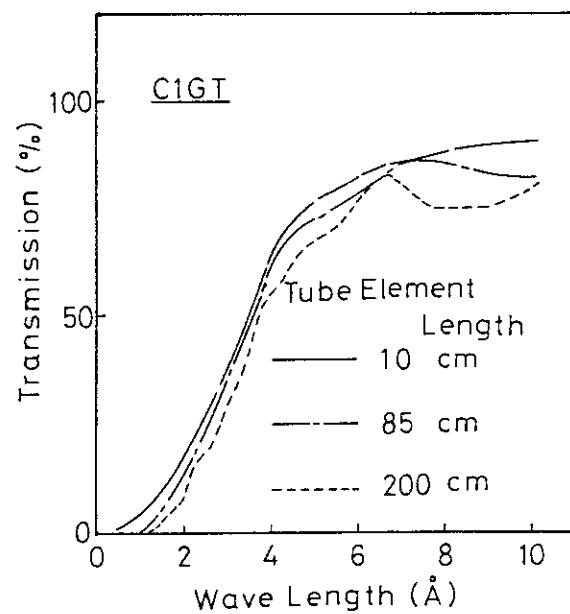
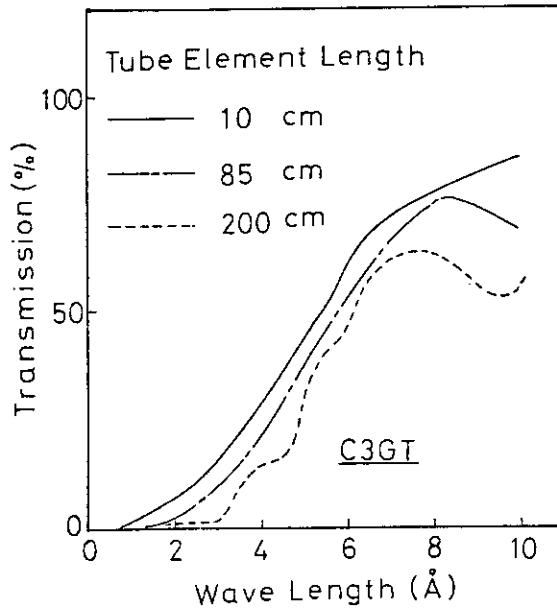


図 4.3-4 導管要素長さの収率への影響

図 4.3-5 導管要素長さの収率への影響
(T 1 導管)図 4.3-6 導管要素長さの収率への影響
(C 1 導管)図 4.3-7 導管要素長さの収率への影響
(C 3 導管)

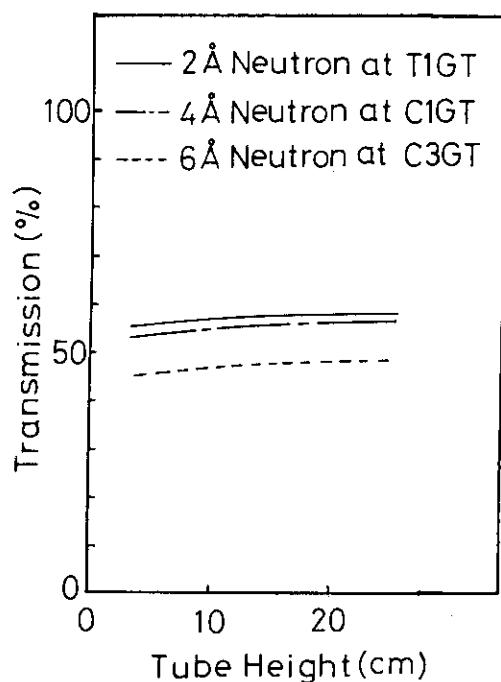


図 4.4-1 導管高さの収率への影響
(反射率 = 0.98)

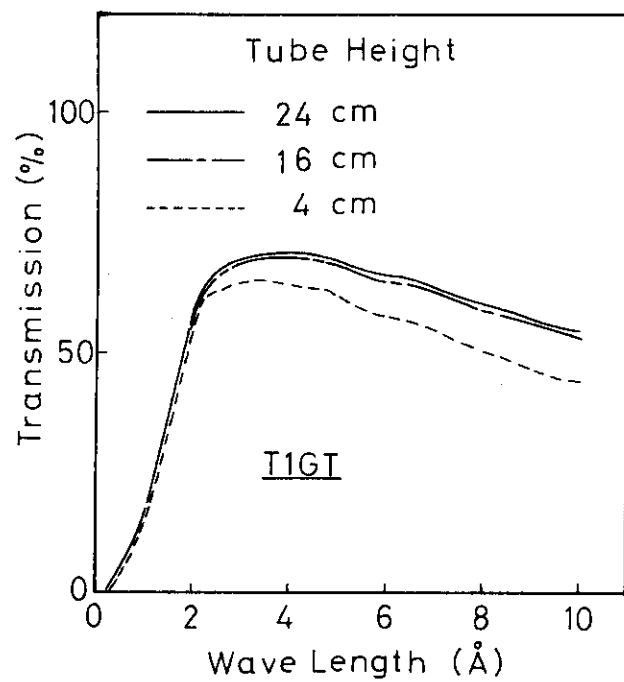


図 4.4-2 導管高さの収率への影響
(T 1 導管 : 反射率 0.98)

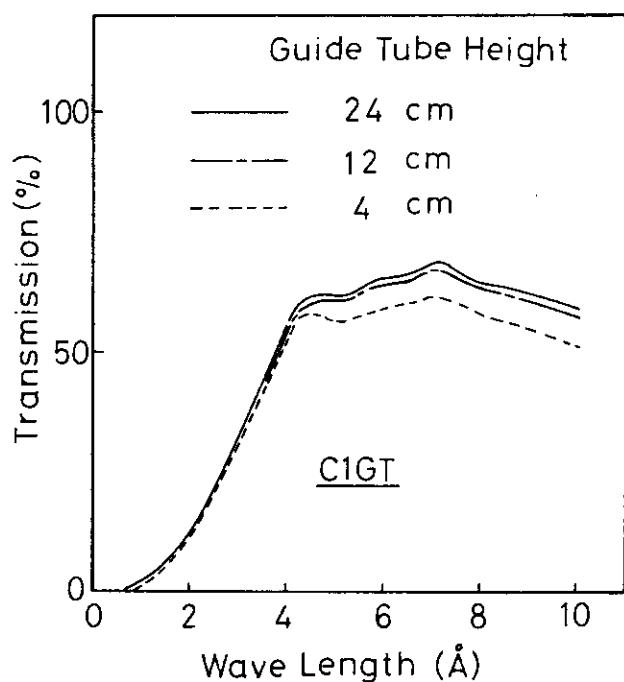


図 4.4-3 導管高さの収率への影響
(C 1 導管 : 反射率 0.98)

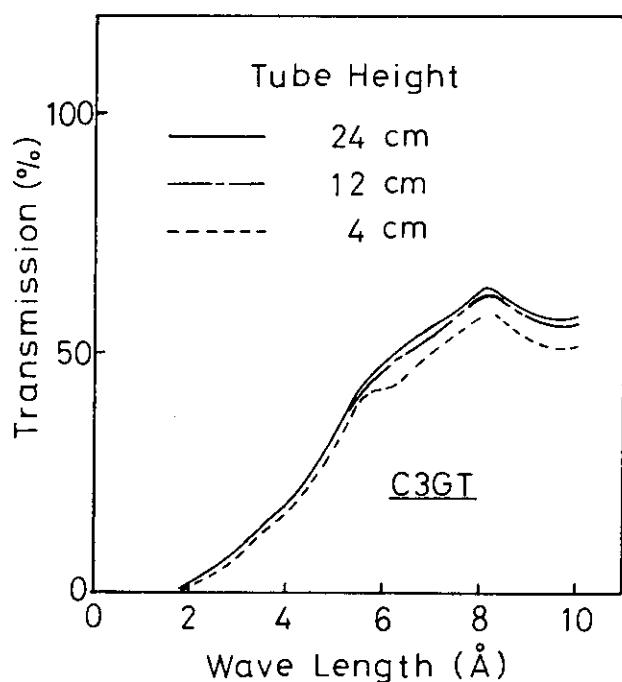


図 4.4-4 導管高さの収率への影響
(C 3 導管 : 反射率 0.98)

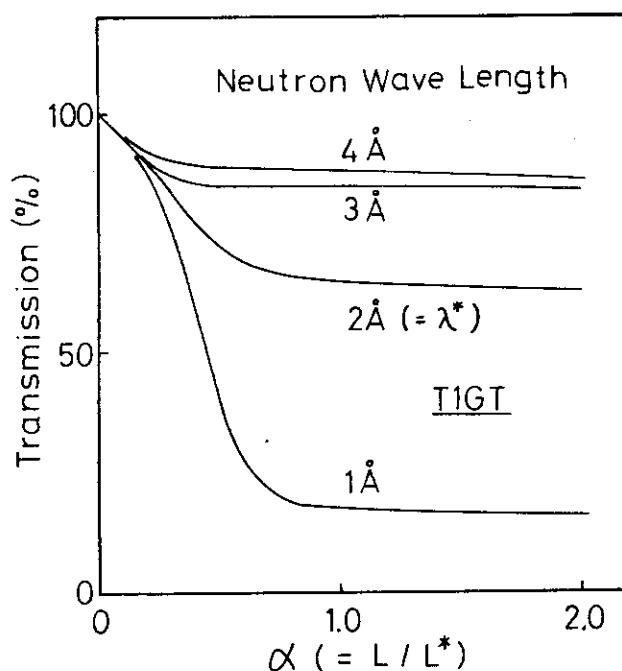


図 4.5-1 曲導管長さの収率への影響
(T1 導管)
(L =曲導管長さ, L^* =直接視距離)

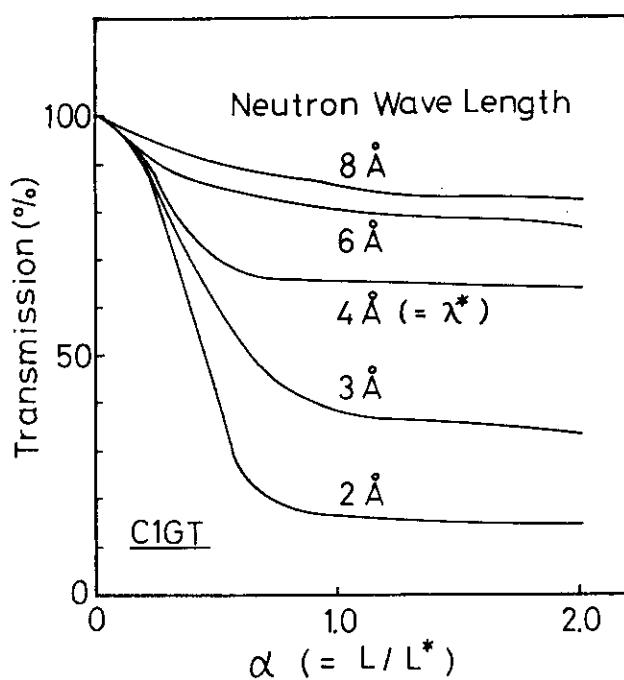


図 4.5-2 曲導管長さの収率への影響
(C1 導管)
(L =曲導管長さ, L^* =直接視距離)

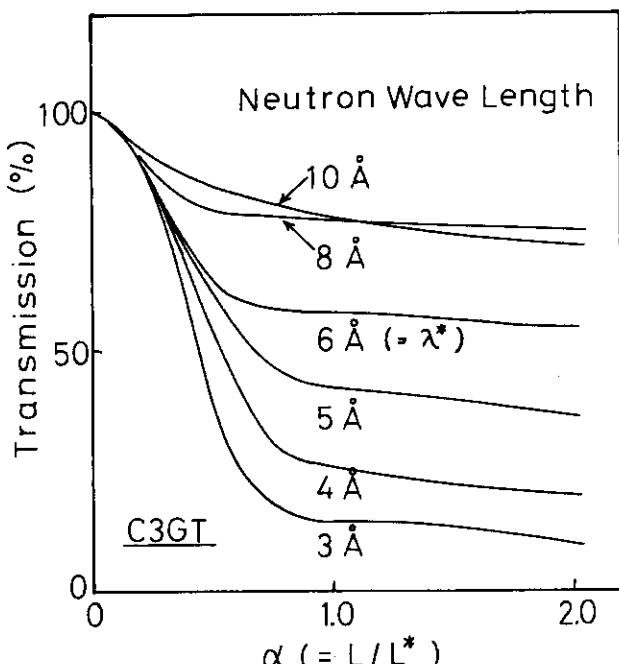


図 4.5-3 曲導管長さの収率への影響
(C3 導管)
(L =曲導管長さ, L^* =直接視距離)

表 4.6-1 導管巾と導管の寸法

		導 管 巾 (cm)		
		1.0	2.0	3.0
2 Å T1GT	曲導管 曲率半径 ρ (km)	1.67	3.34	5.01
	直接視 距離 L^* (cm)	11.6	23.1	34.1
	曲導管 長さ $(\frac{L}{L^*} \sim 1.5)$ L (m)	17.4	35.7	53.6
4 Å C1GT	曲導管 曲率半径 ρ (km)	0.56	0.84	1.67
	直接視 距離 L^* (m)	6.7	11.6	20.0
	曲導管 長さ $(\frac{L}{L^*} \sim 1.5)$ L (m)	9.8	17.0	29.4
6 Å C3GT	曲導管 曲率半径 ρ (km)	0.19	0.37	0.56
	直接視 距離 L^* (m)	3.9	7.7	11.6
	曲導管 $(\frac{L}{L^*} \sim 2.0)$ 長さ L (m) $(\frac{L}{L^*} \sim 1.5)$	7.7	15.3	23.0
		5.8	11.6	17.3

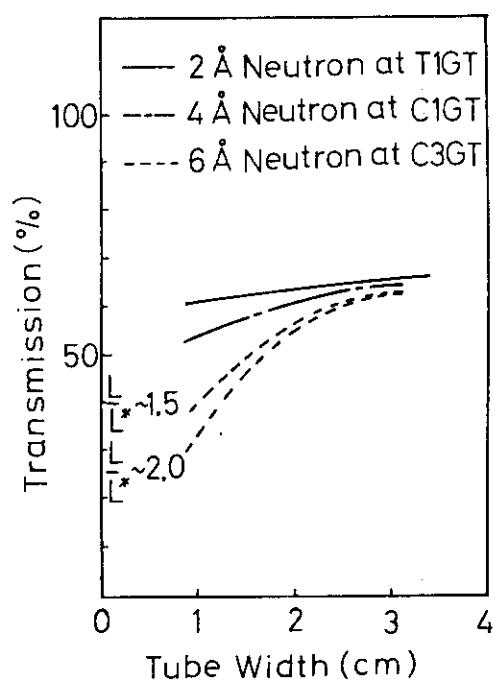


図 4.6 - 1 導管巾の収率への影響
(反射率 = 1.0, L = 曲導管長さ
 L^* = 直接視距離)

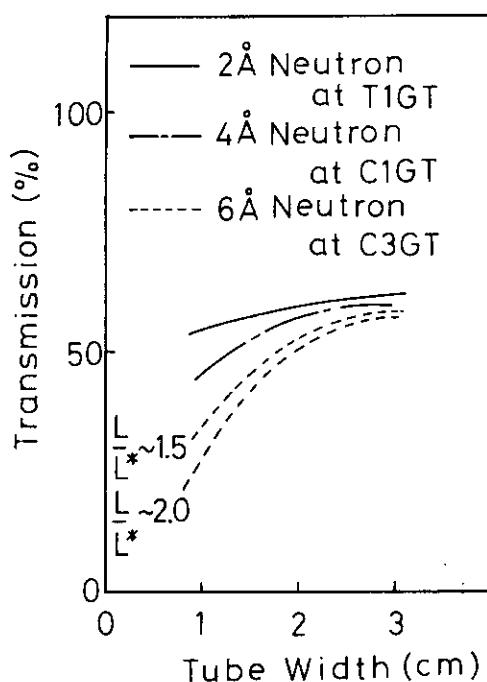
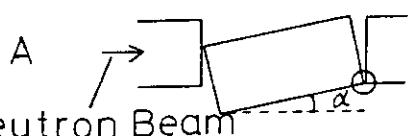
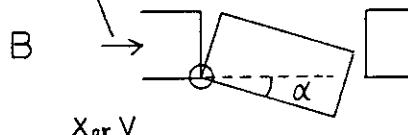
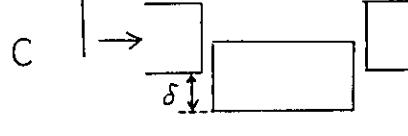
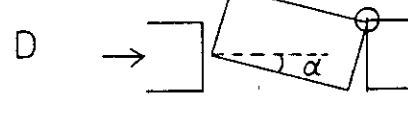
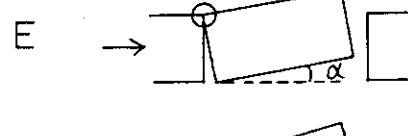


図 4.6 - 2 導管巾の収率への影響
(反射率 = 0.98, L = 曲導管長さ,
 L^* = 直接視距離)

表 4.7-1 NEUGT が解析する接合誤差の種類

Sort of Abutment Error	Magnitude
A 	Rotation α (deg)
B 	Rotation α (deg)
C 	Parallel Movement δ (cm)
D 	Rotation α (deg)
E 	Rotation α (deg)
F 	Rotation α (deg)

note : \odot shows a rotation axis.

- : α is positive in a counterclockwise rotation.
and negative in a clockwise rotation.
- : δ is positive along a positive x or y axis.

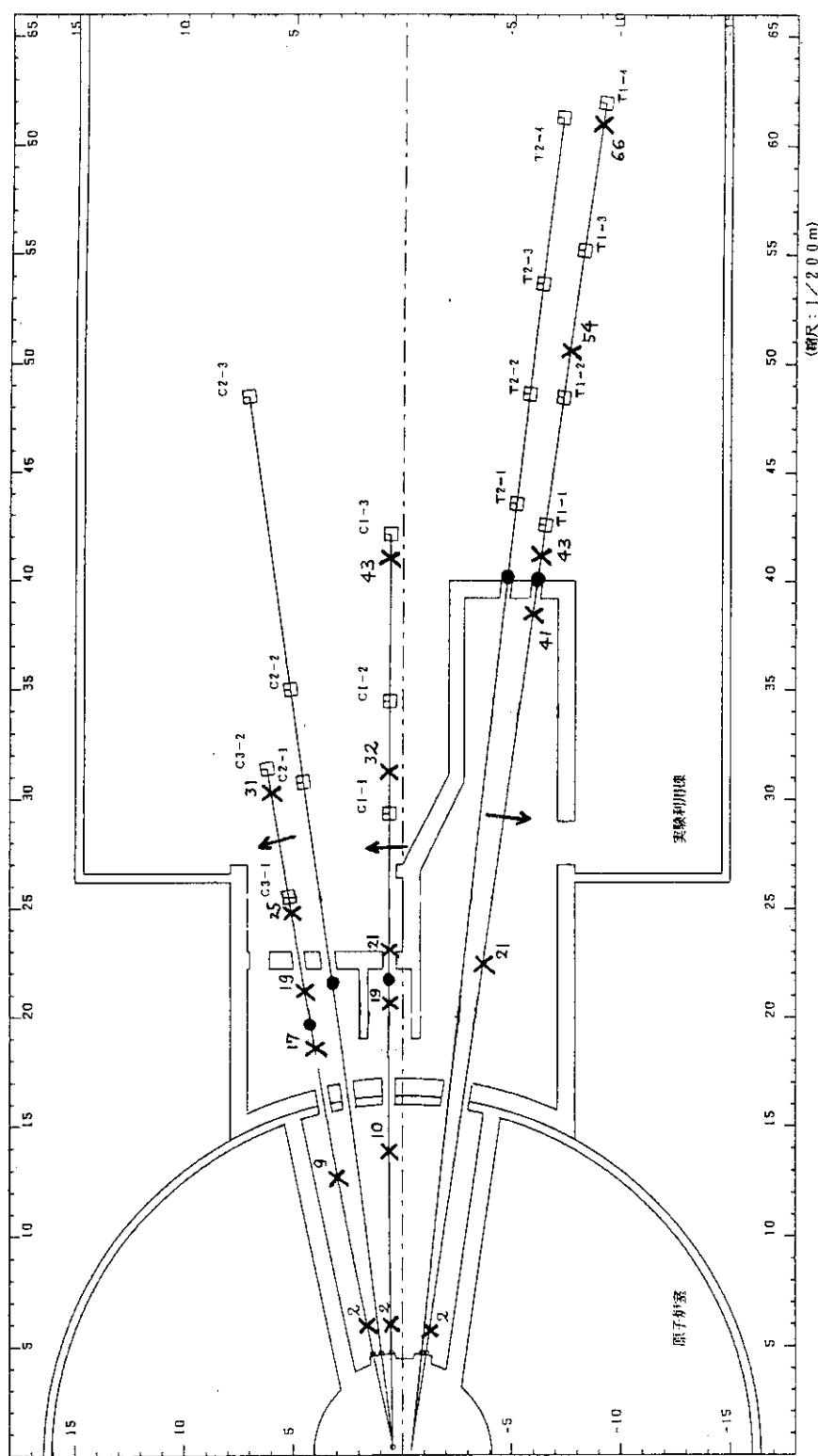


図 4.7-1 導管略図と解析で接合誤差を発生させた場所（×で示す：数字は要素番号）

- 印は曲導管部の終端である。
- C型接合誤差の場合は矢印方向を正とする。

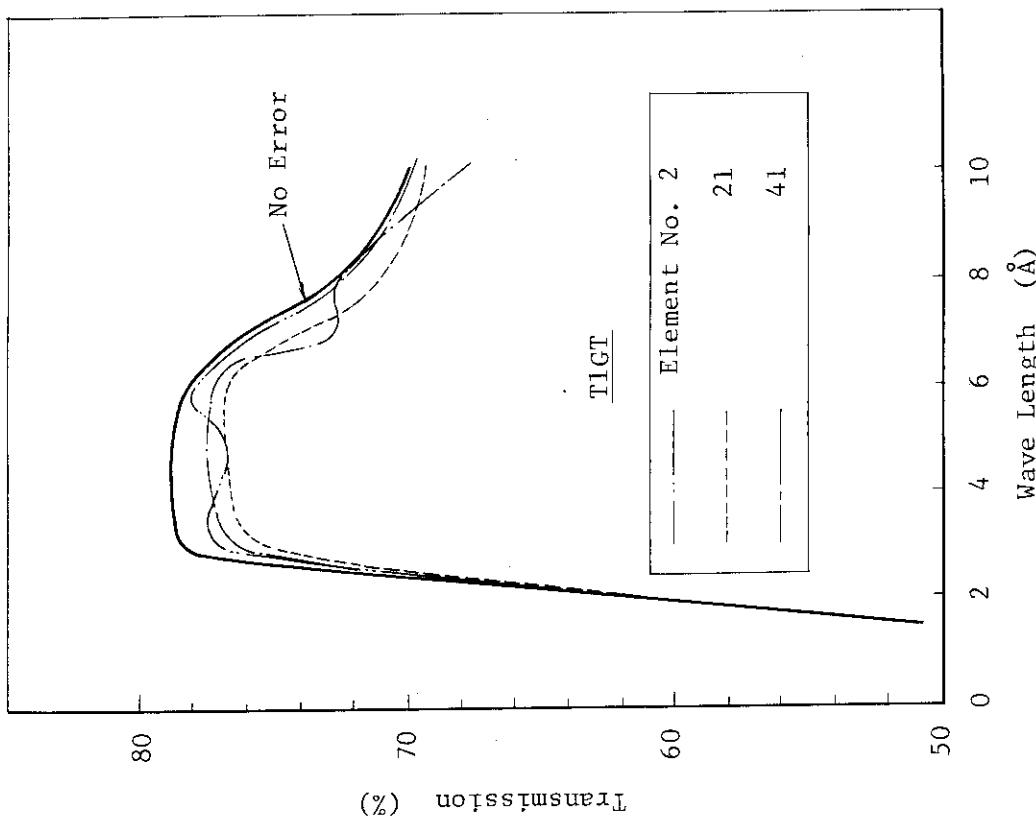


図 4.7-3 曲導管部（導管要素番号 2, 21, 41）に
A型接合誤差（-0.015度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させて
表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

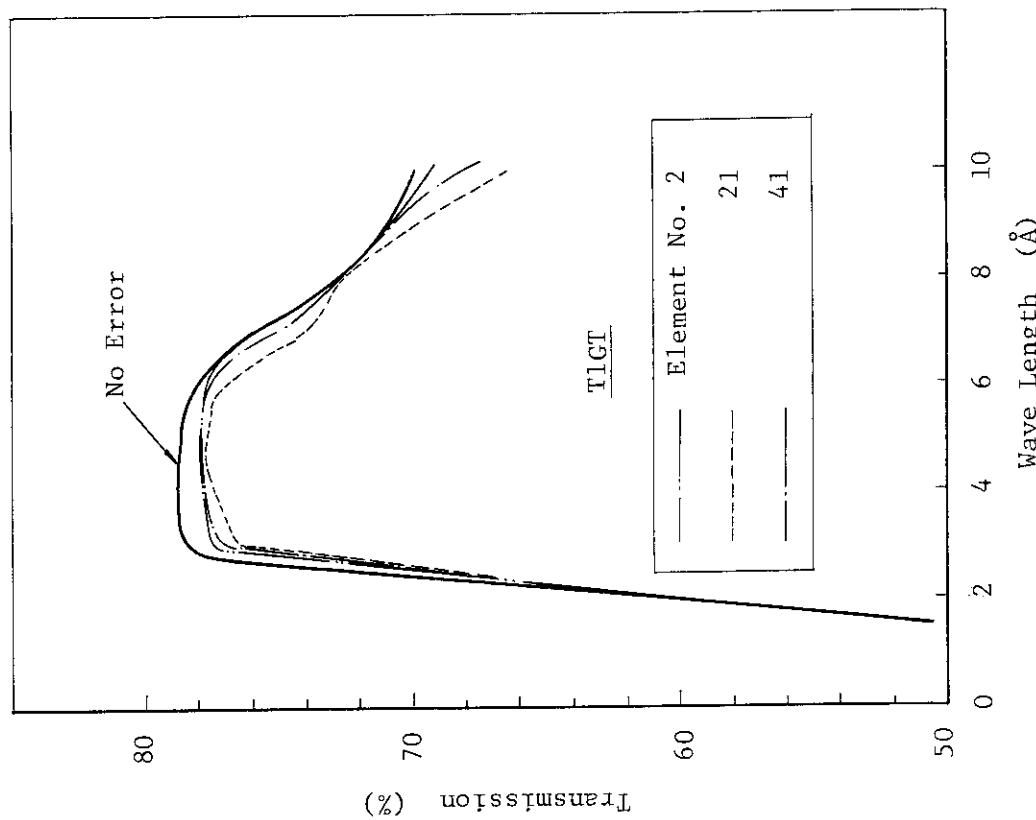


図 4.7-2 曲導管部（導管要素番号 2, 21, 41）に
A型接合誤差（-0.008度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させて
表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

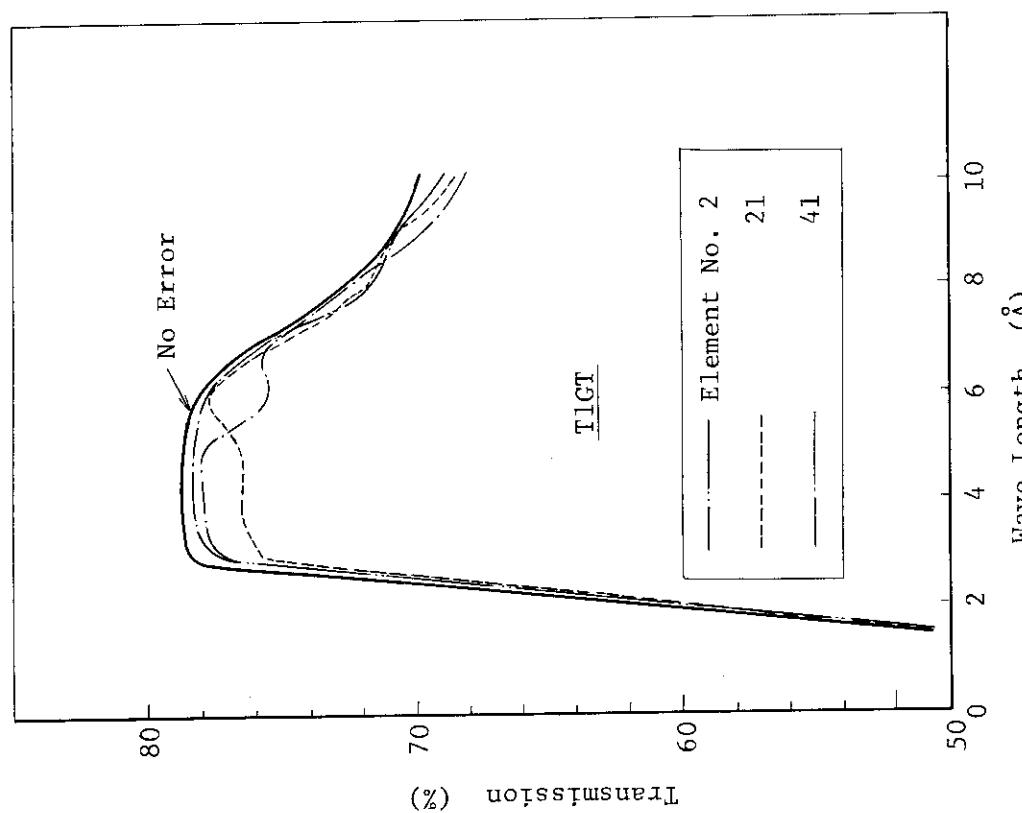


図4.7-4 曲導管部（導管要素番号2, 21, 41）にB型接合誤差（+0.008度）が生じた時のTransmission（誤差の符号は図4.7-1の矢印と表4.7-1のX方向を一致させて表4.7-1の脚注で定めたものである）

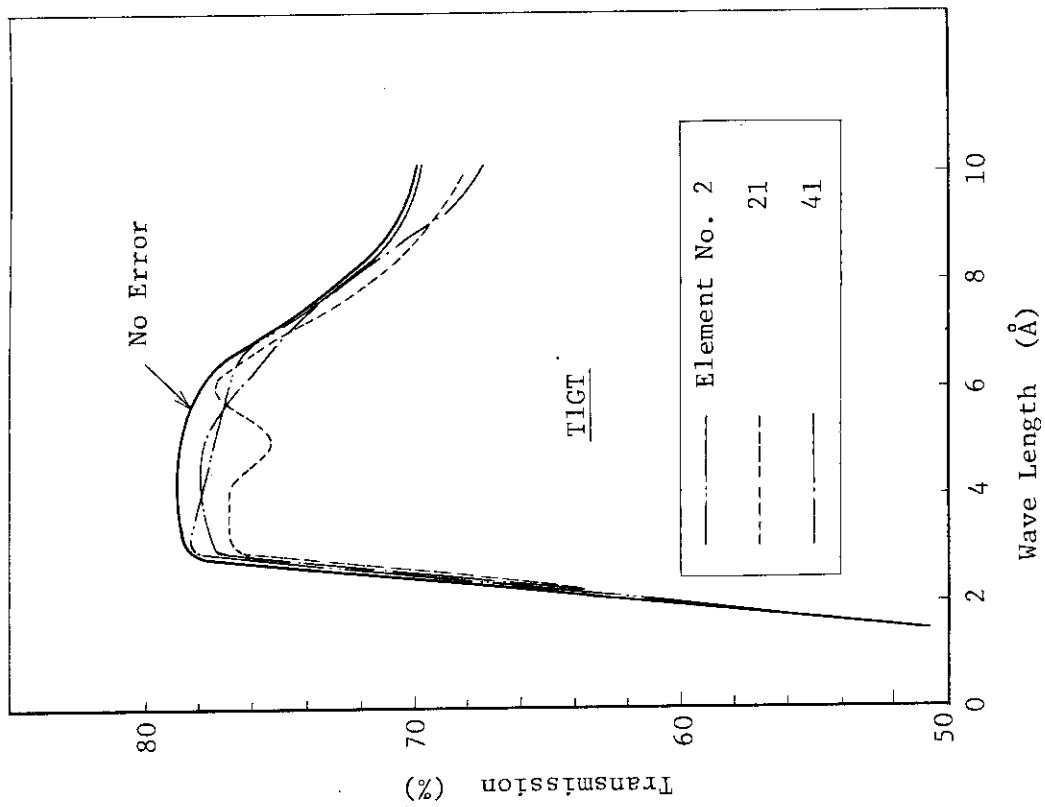


図4.7-5 曲導管部（導管要素番号2, 21, 41）にB型接合誤差（+0.015度）が生じた時のTransmission（誤差の符号は図4.7-1の矢印と表4.7-1のX方向を一致させて表4.7-1の脚注で定めたものである）

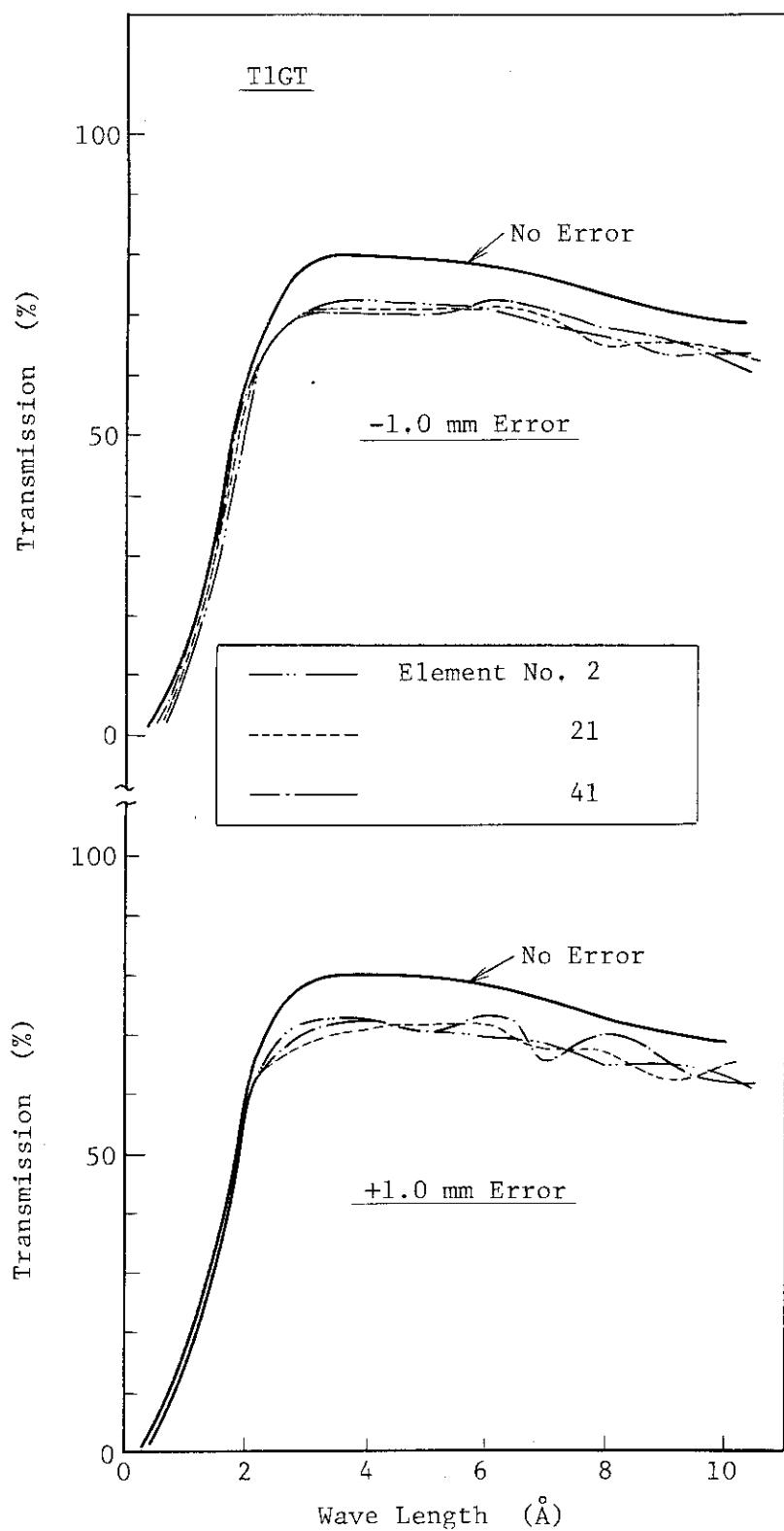


図 4.7-6 曲導管部（導管要素番号 2, 21, 41）に
C型接合誤差 (-1.0, +1.0 mm) が生じた時の
Transmission (誤差の符号は図 4.7-1 をみよ)

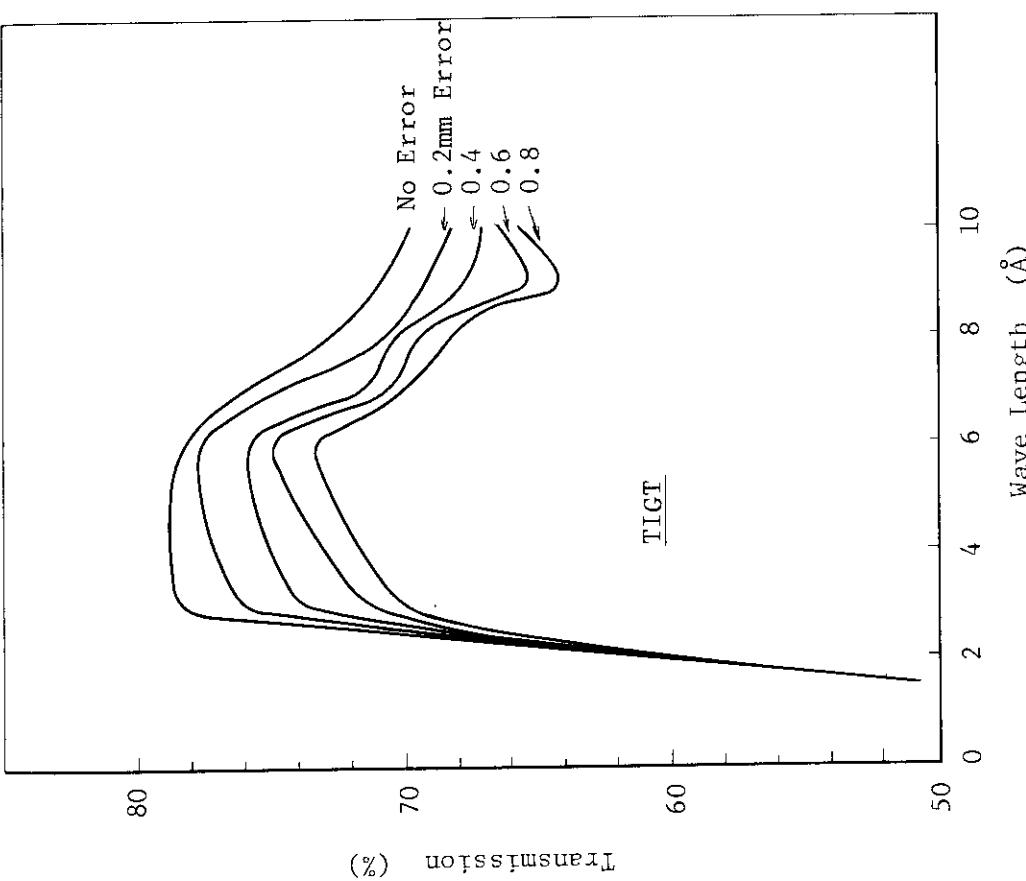


図 4.7 - 7 曲導管部（導管要素番号 21）に C型接合誤差
が生じた時の導管 Transmission
(IF の方向へのずれ：図 4.7 - 1 参照)

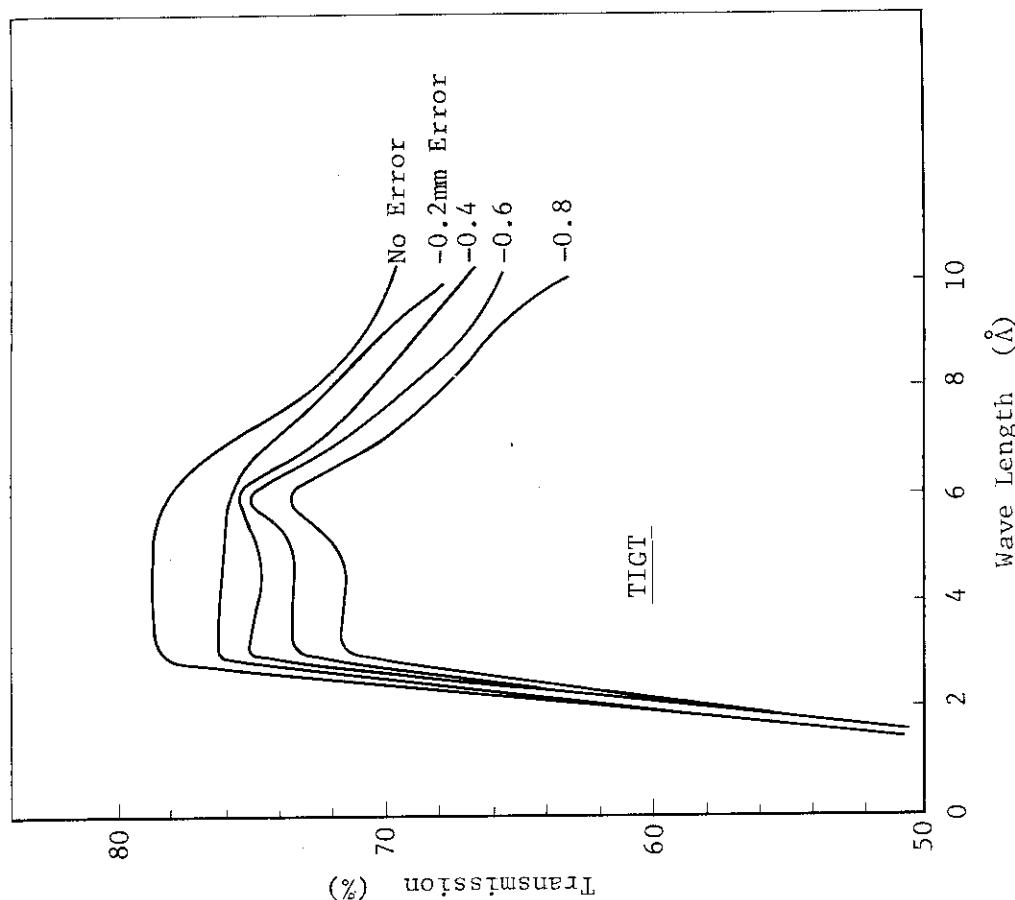


図 4.7 - 8 曲導管部（導管要素番号 21）に C型接合誤差
が生じた時の導管 Transmission
(負の方向へのずれ：図 4.7 - 1 参照)

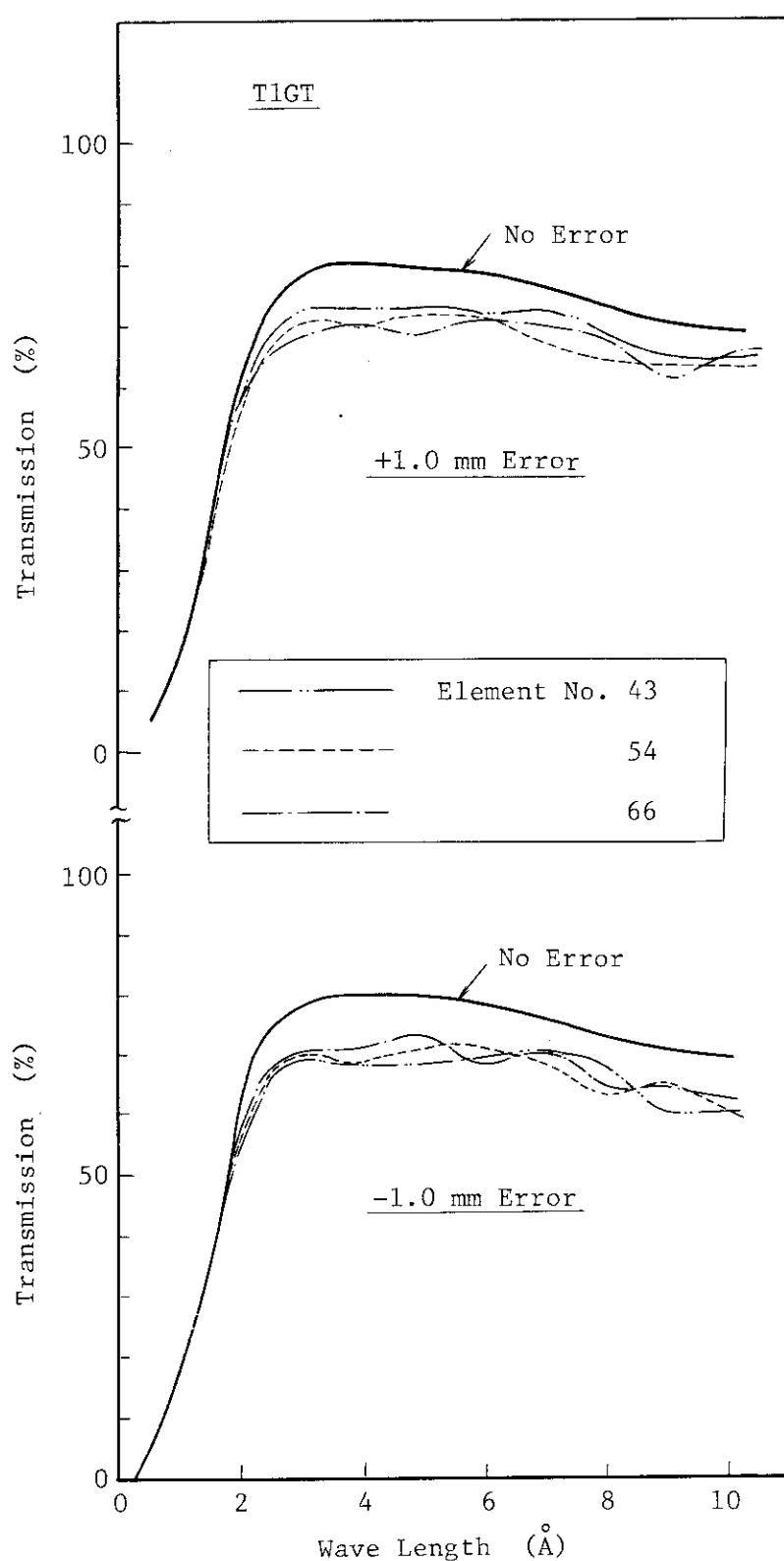


図 4.7-9 直導管部（導管要素番号 43, 54, 66）に
C型接合誤差（1.0, -1.0 mm）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1 をみよ）

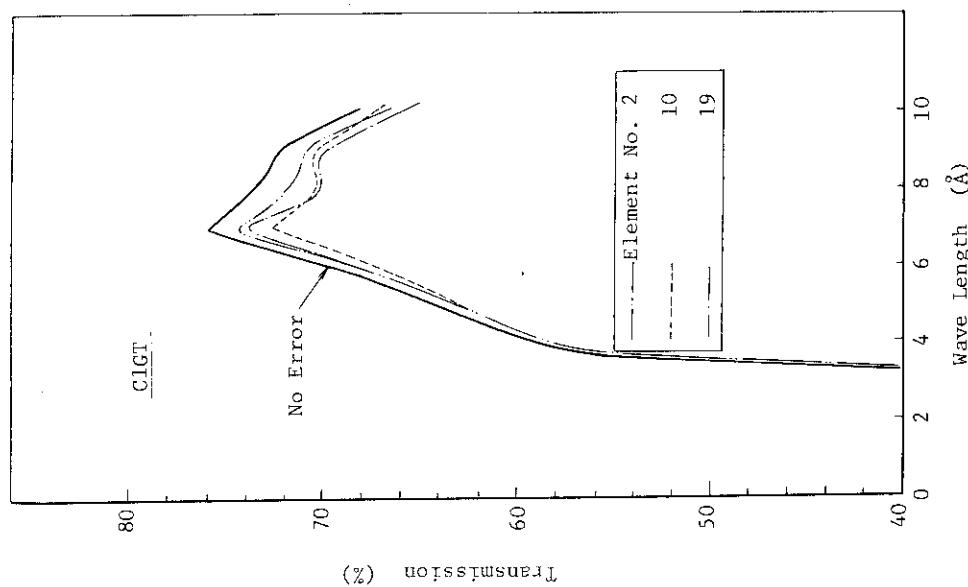


図 4.7-11 曲導管部（導管要素番号 2, 10, 19）に
A型接合誤差（-0.029度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させ
て、表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

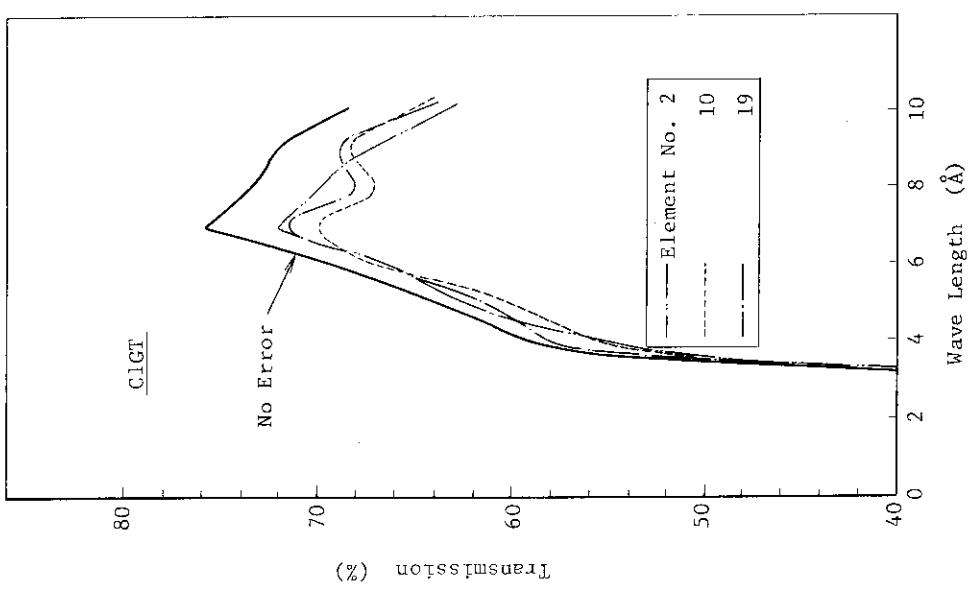


図 4.7-10 曲導管部（導管要素番号 2, 10, 19）に
A型接合誤差（-0.058度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させ
て、表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

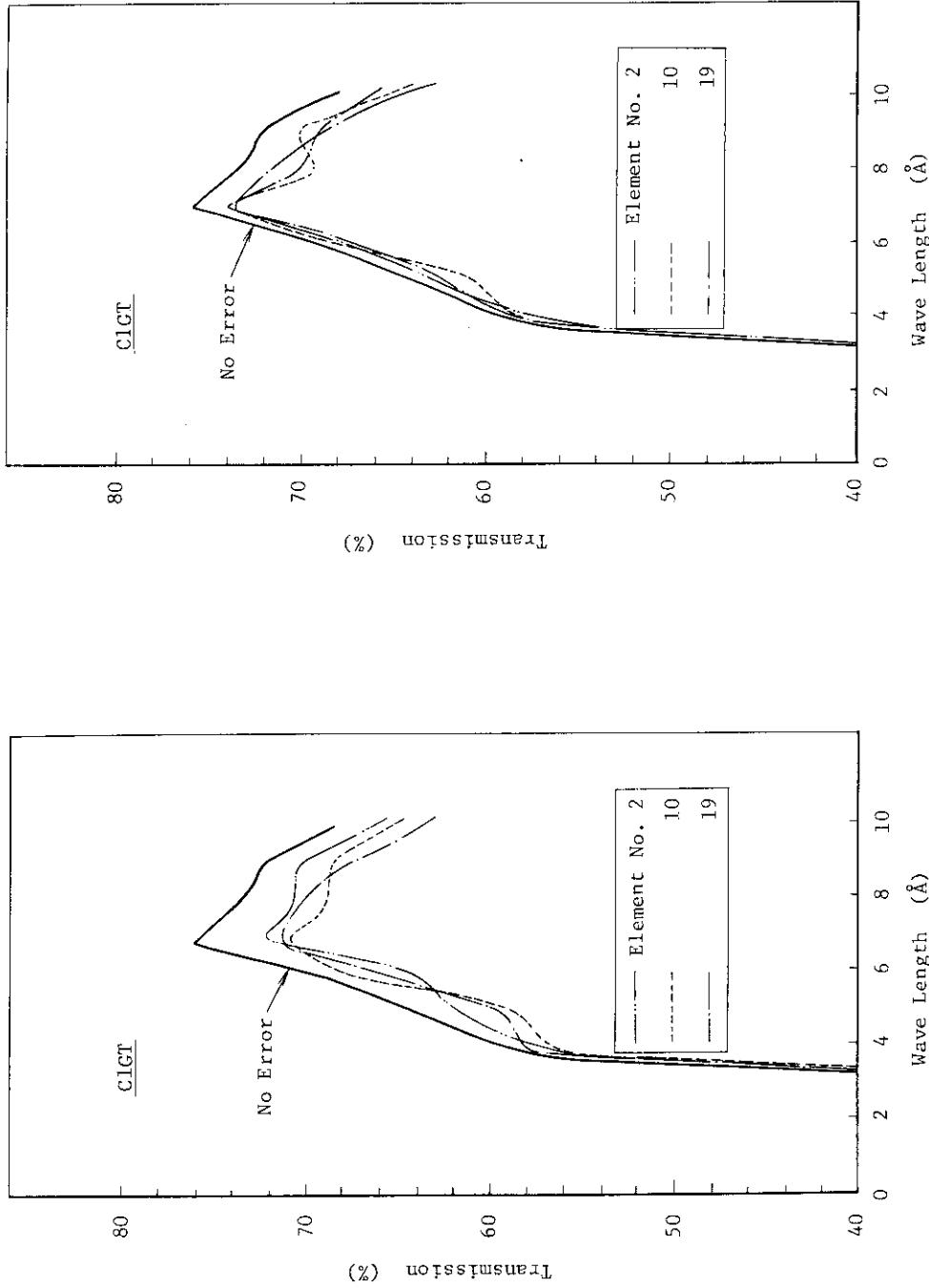


図 4.7 - 12 曲導管部（導管要素番号 2, 10, 19）に
B型接合誤差（+0.058 度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させて
表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

図 4.7 - 13

曲導管部（導管要素番号 2, 10, 19）に
B型接合誤差（+0.029 度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させて
表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

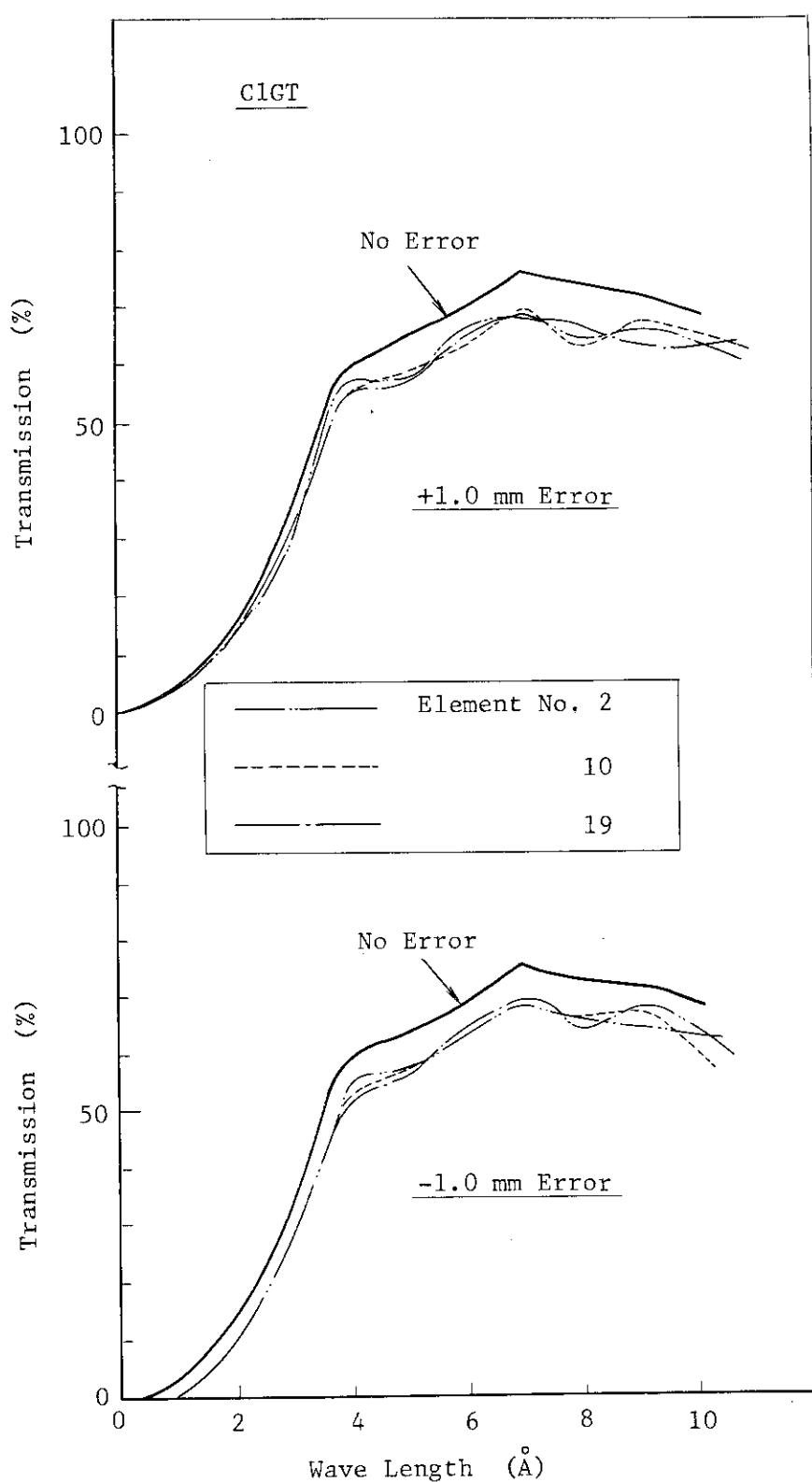


図 4.7-14 曲導管部（導管要素番号 2, 10, 19）に
C型接合誤差（1.0, -1.0 mm）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1 をみよ）

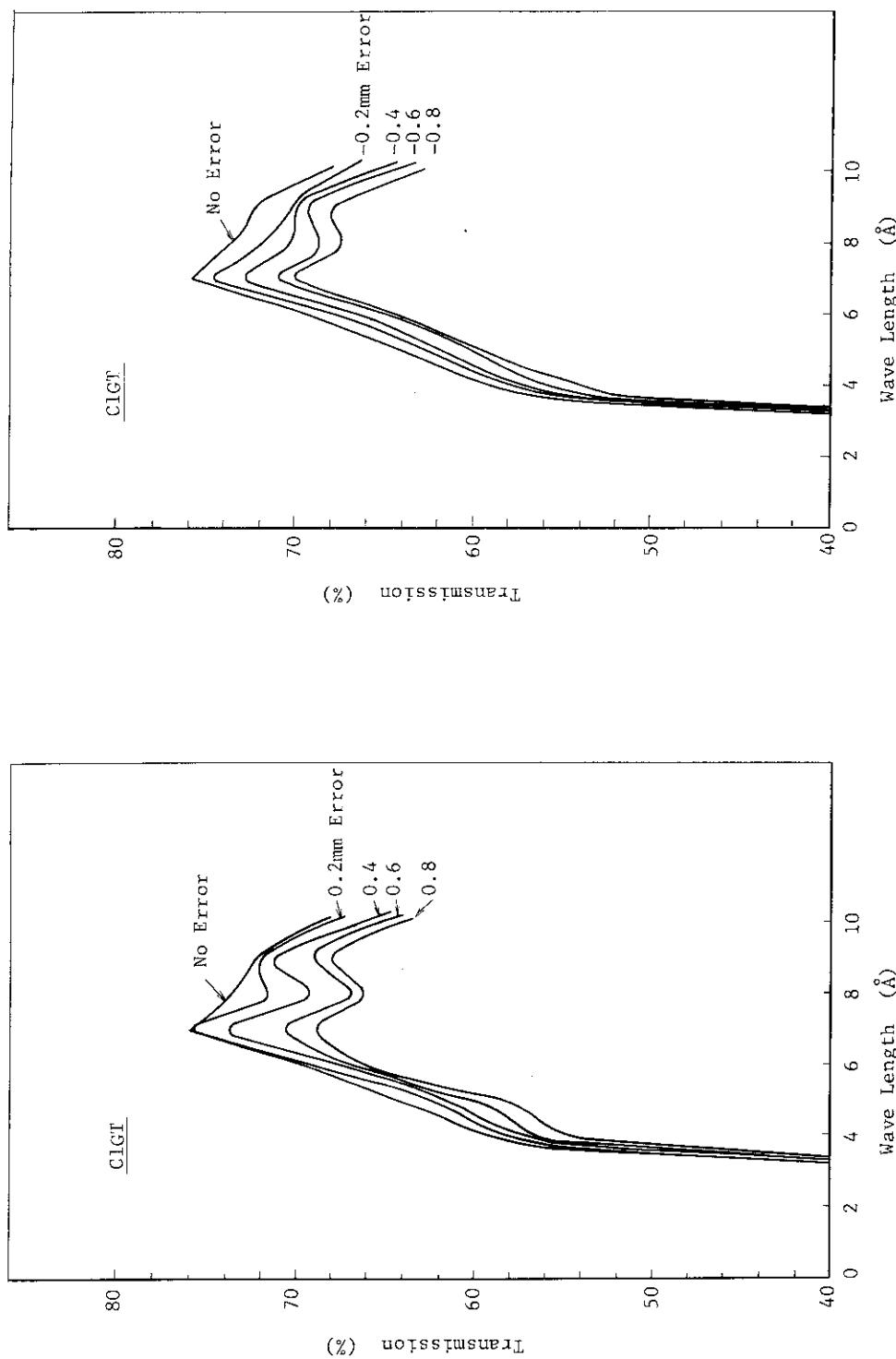


図 4.7 - 15 曲導管部（導管要素番号 10）に C型接合誤差が生じた時の導管 Transmission
(正の方向へのずれ：図 4.7-1 参照)

図 4.7 - 16 曲導管部（導管要素番号 10）に C型接合誤差が生じた時の導管 Transmission
(負の方向へのずれ：図 7.7-1 参照)

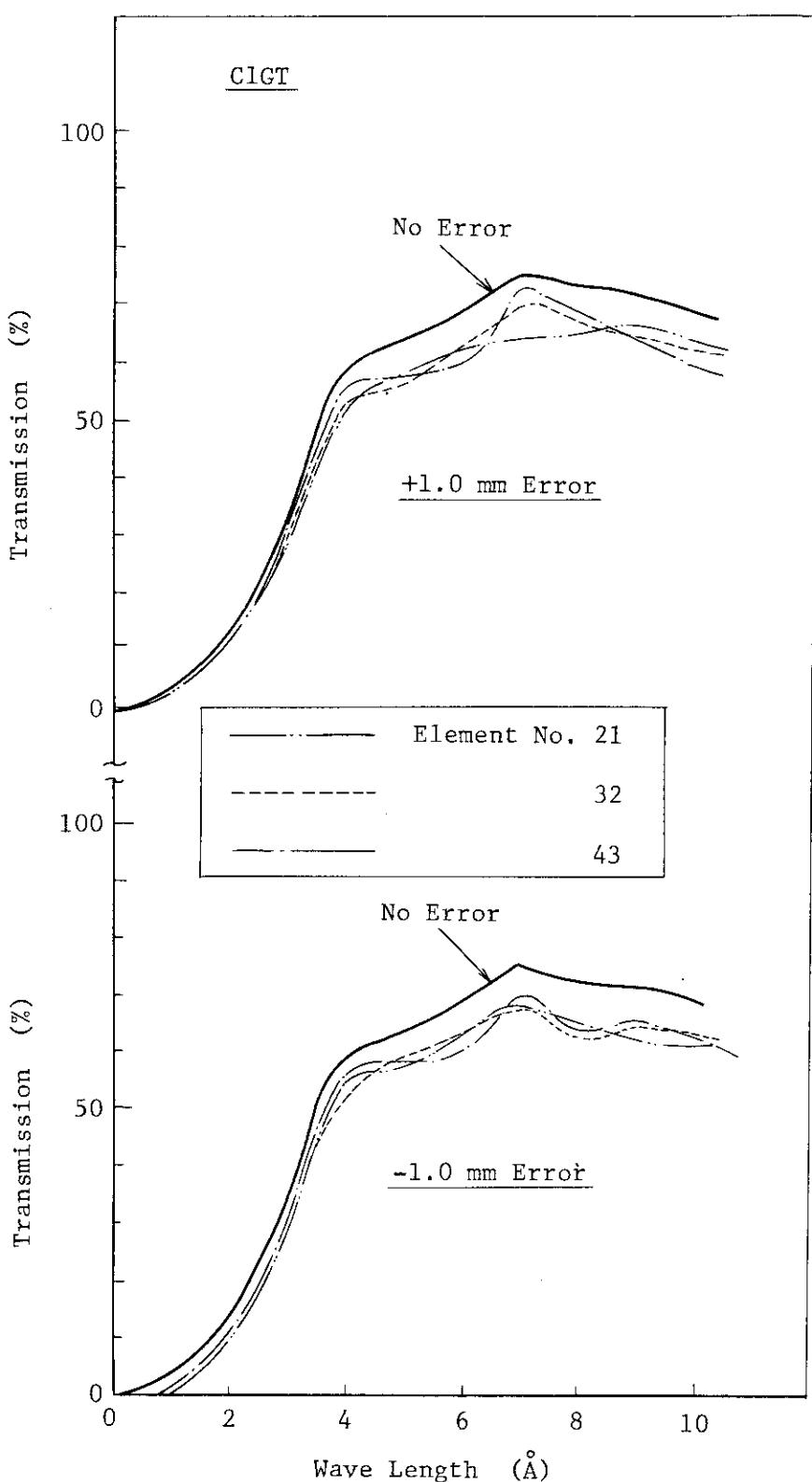


図 4.7 - 17 直導管部（導管要素番号 21, 32, 43）に
C型接合誤差（1.0, -1.0 mm）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7 - 1 をみよ）

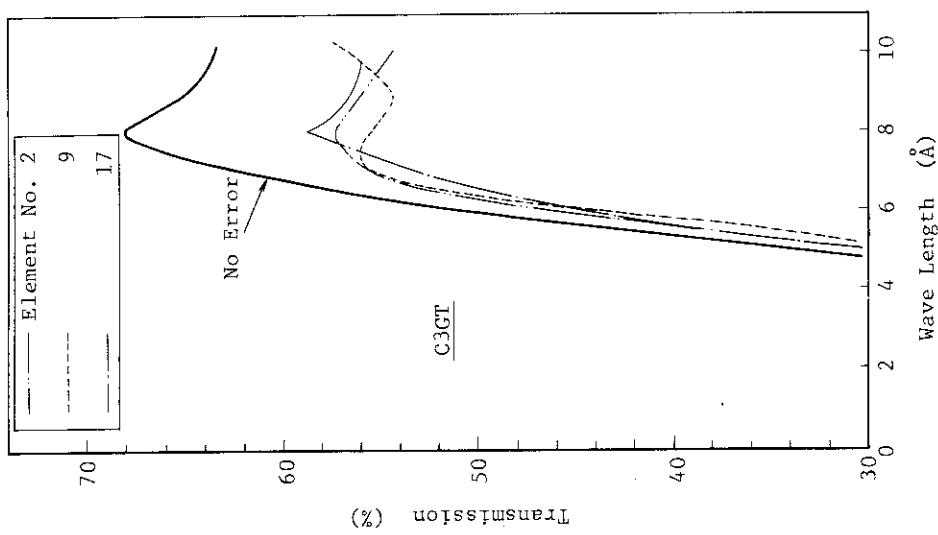


図 4.7-18 曲導管部（導管要素番号 2, 9, 17）にて
A型接合誤差（-0.131度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させ
て表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

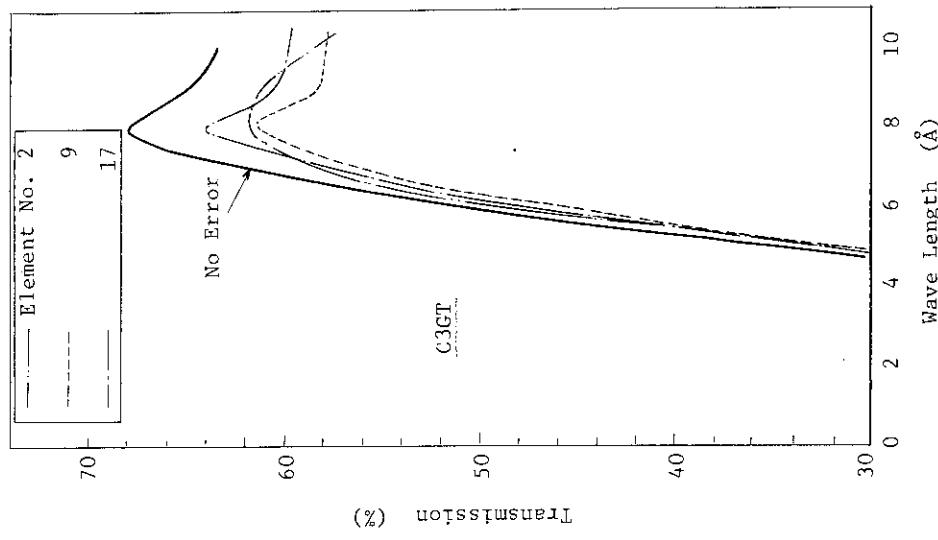


図 4.7-19 曲導管部（導管要素番号 2, 9, 17）にて
A型接合誤差（-0.066度）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させ
て表 4.7-1 の脚注で定めたものである）

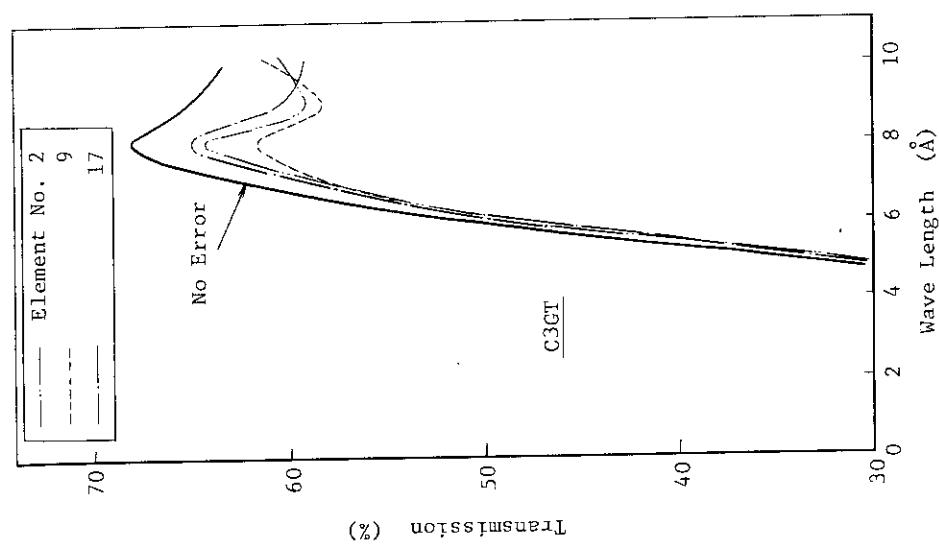


図 4.7-20 曲導管部(導管要素番号 2, 9, 17)に
B型接合誤差(+0.065度)が生じた時の
Transmission(誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させ
て表 4.7-1 の脚注で定めたものである)

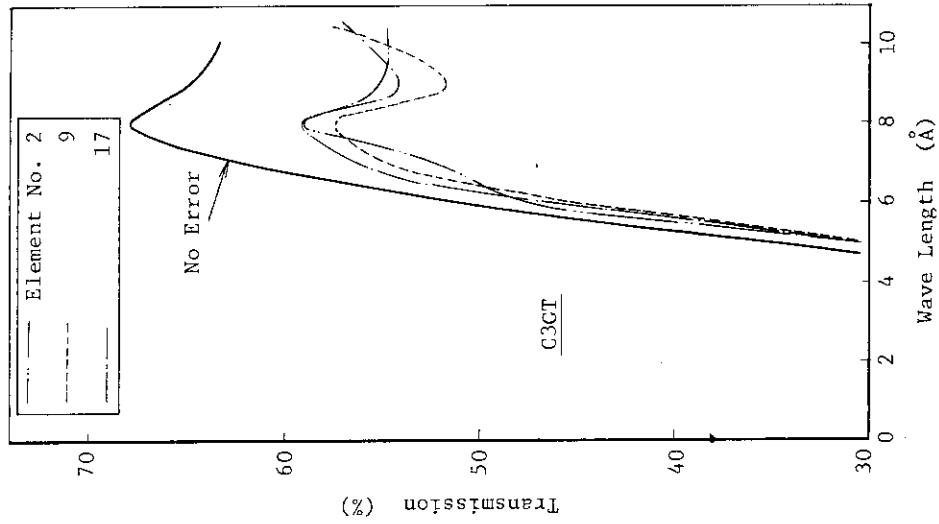


図 4.7-21 曲導管部(導管要素番号 2, 9, 17)に
B型接合誤差(+0.130度)が生じた時の
Transmission(誤差の符号は図 4.7-1
の矢印と表 4.7-1 の X 方向を一致させ
て表 4.7-1 の脚注で定めたものである)

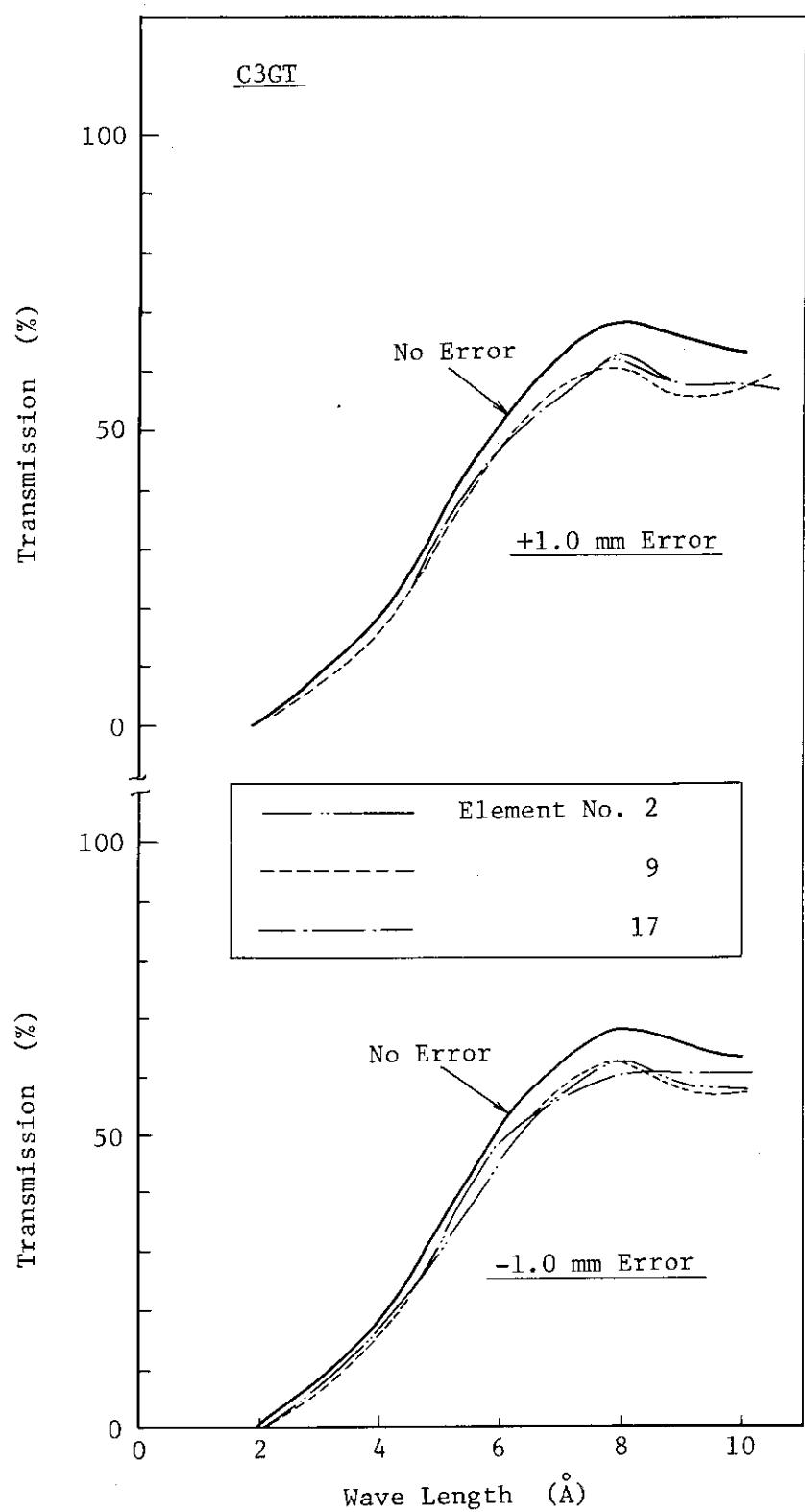


図 4.7-22 曲導管部（導管要素番号 2, 9, 17）に
C型接合誤差（1.0, -1.0 mm）が生じた時の
Transmission（誤差の符号は図 4.7-1 をみよ）

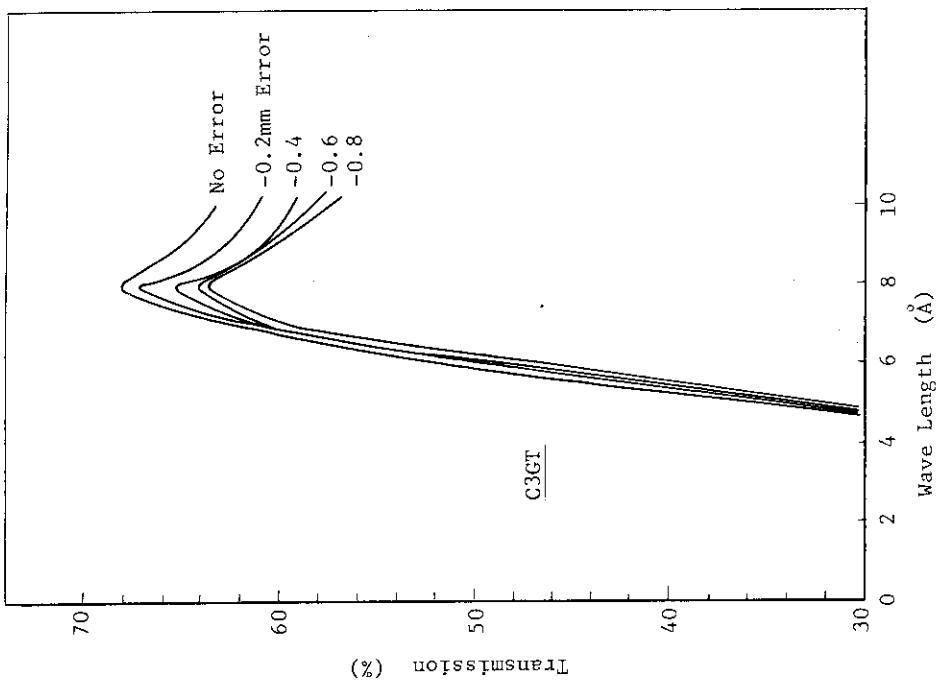


図 4.7-24 曲導管部（導管要素番号 9）に
C型接合誤差が生じた時の導管 Transmission
(負の方向へのずれ：図 4.7-1 参照)

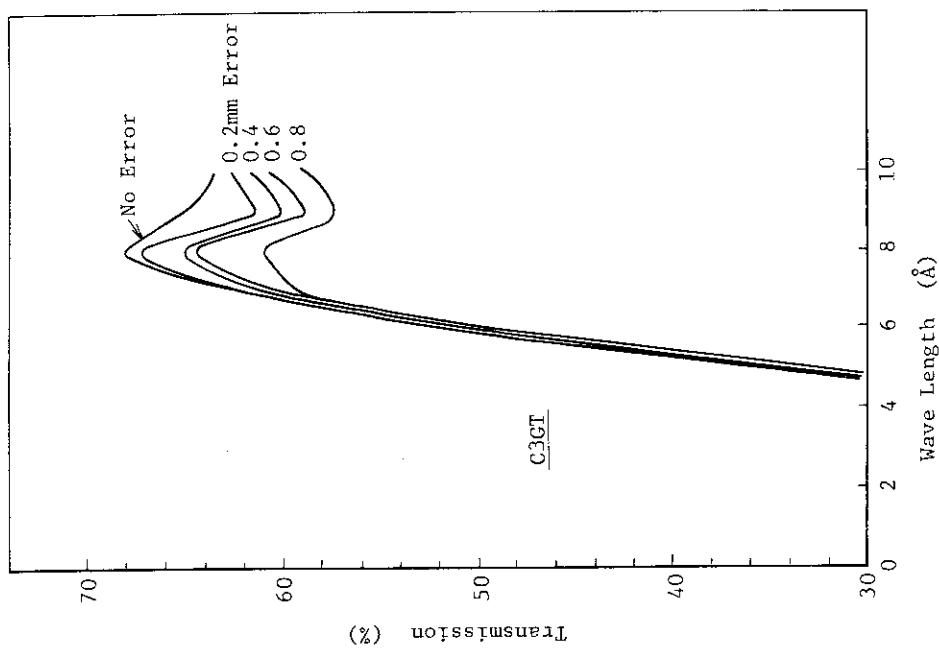


図 4.7-23 曲導管部（導管要素番号 9）に
C型接合誤差が生じた時の導管 Transmission
(正の方向へのずれ：図 4.7-1 参照)

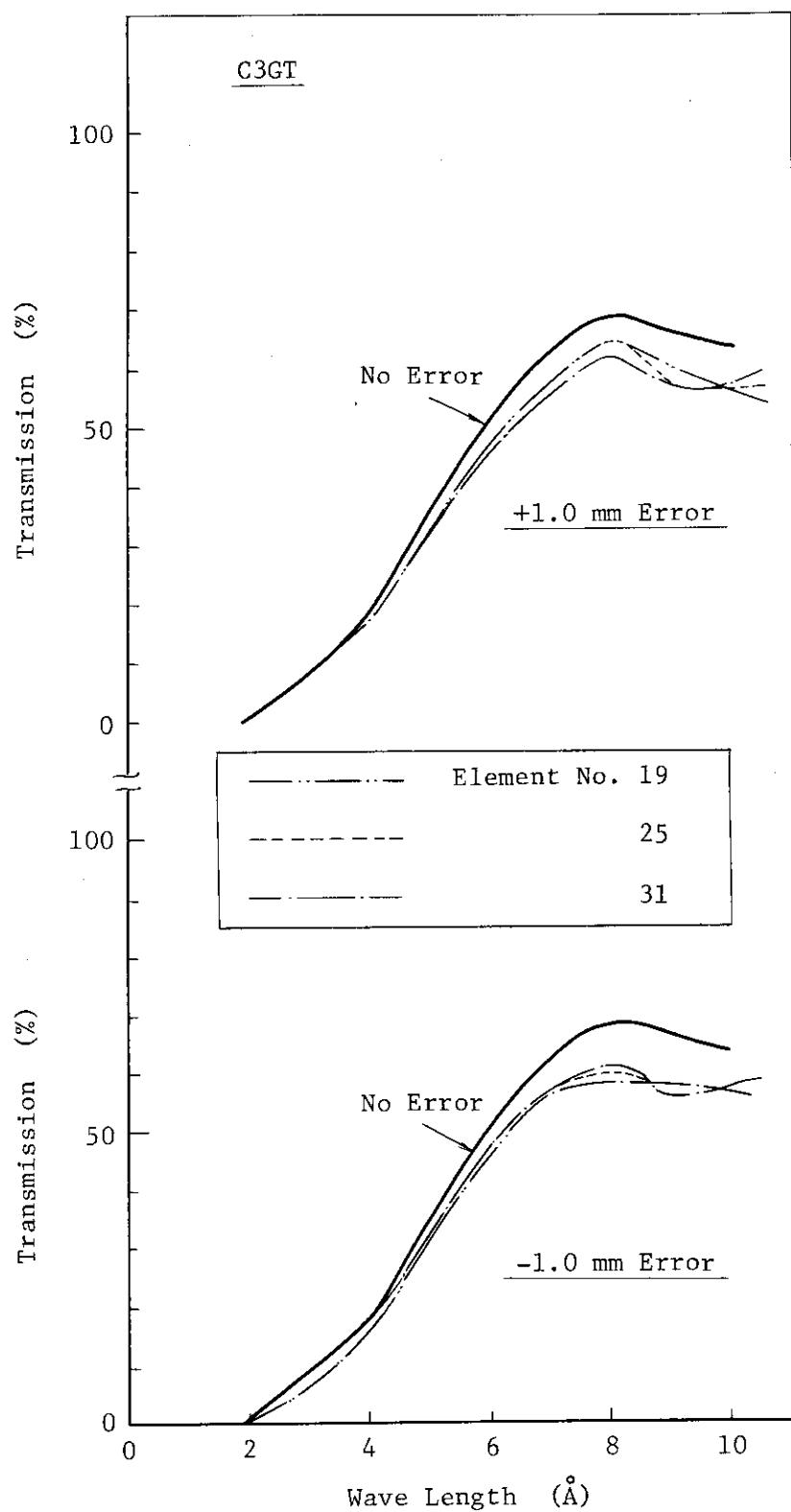


図 4.7-25 直導管部（導管要素番号 19, 25, 31）に
C型接合誤差 (+1.0, -1.0 mm) が生じた時の
Transmission (誤差の符号は図 4.7-1 をみよ)

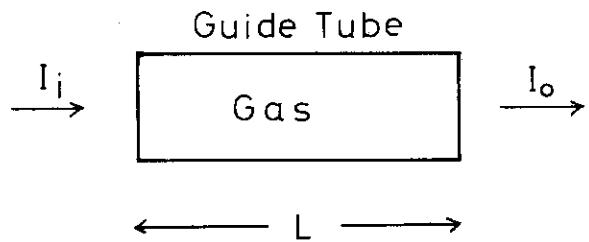
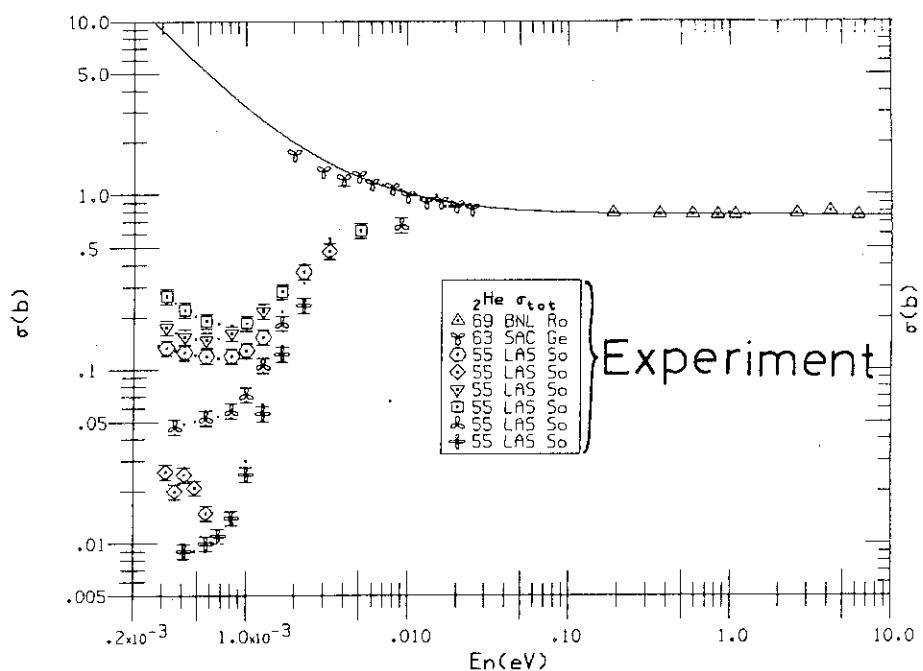
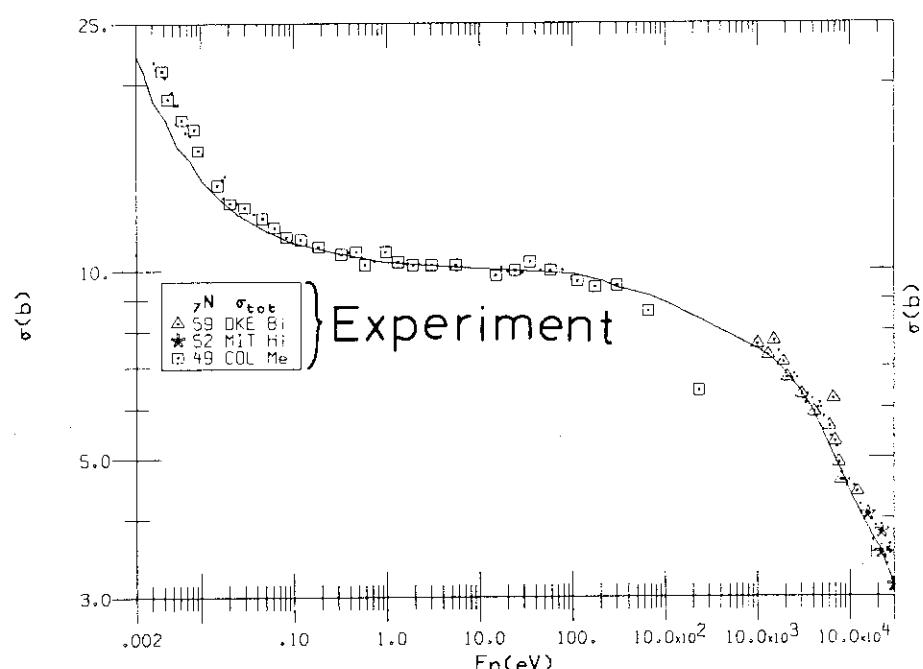
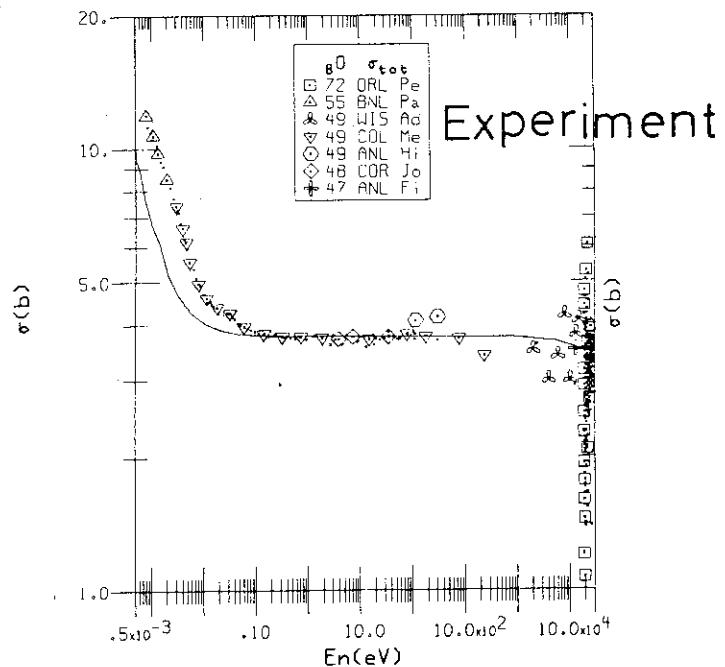


図 4.8-1 気体による中性子の減衰

表 4.8-1 気体による中性子減衰率

<u>He</u>	P (atm)	σ (barn)	$(I_i - I_o)/I_i$
$L = 60\text{ m}$ for thermal neutron	1.0	1.0	0.14
$L = 45\text{ m}$ for cold neutron	1.0	1.5	0.16
<u>Air</u>	P (atm)	σ (barn)	$(I_i - I_o)/I_i$
$L = 60\text{ m}$ for thermal neutron	10^{-1}	15	0.21
	10^{-2}	15	0.023
	4.3×10^{-3}	15	0.01
	10^{-3}	15	0.0023
$L = 45\text{ m}$ for cold neutron	10^{-1}	20	0.21
	10^{-2}	20	0.023
	4.3×10^{-3}	20	0.01
	10^{-3}	20	0.0023

Total Neutron Cross Section: ^{2}He Total Neutron Cross Section: ^{7}N 図 4.8-2 中性子の気体による全断面積⁴⁾



Total Neutron Cross Section: 80 O

図 4.8-2 (続き)

表 4.9-1 Al, Zr, Air (1 atm) 中の中性子損失 (%)

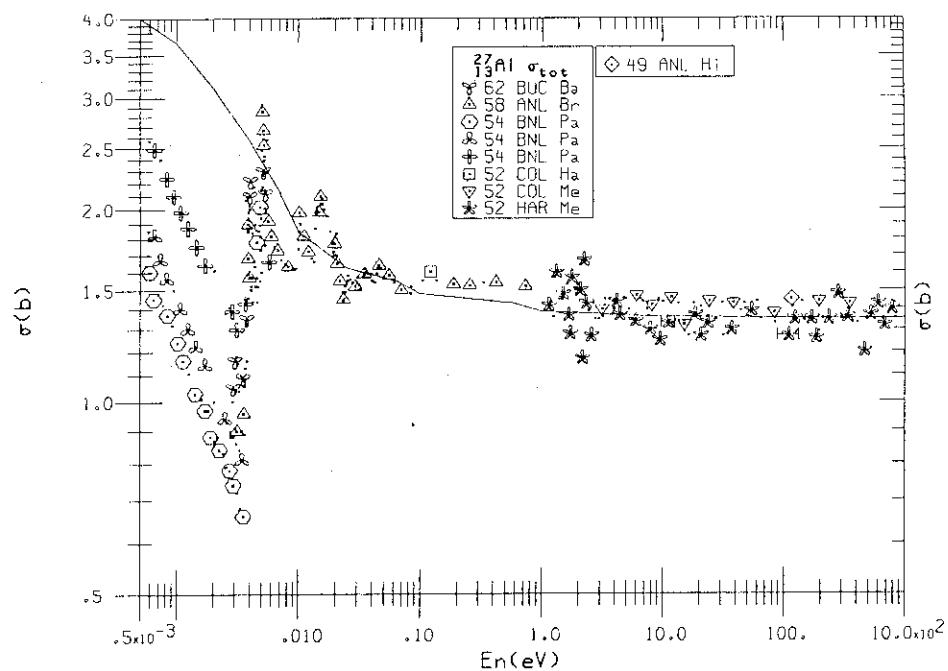
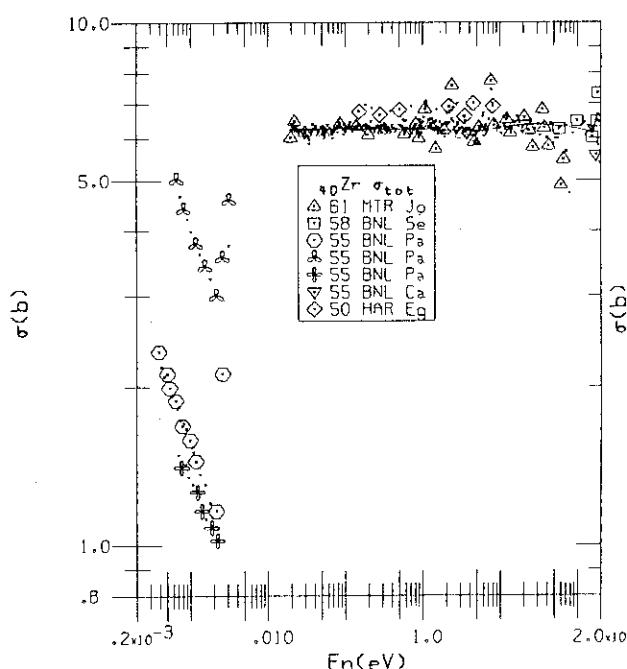
	厚さ (mm)						
	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0	10.0	15.0
Al	1.8	5.3	8.6	11.8	15.0	16.5	23.7
Zr	2.6	7.5	12.1	16.6	20.8	22.8	32.2
	厚さ (mm)						
	10	20	30	40	50	60	70
Air (1 atm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.4

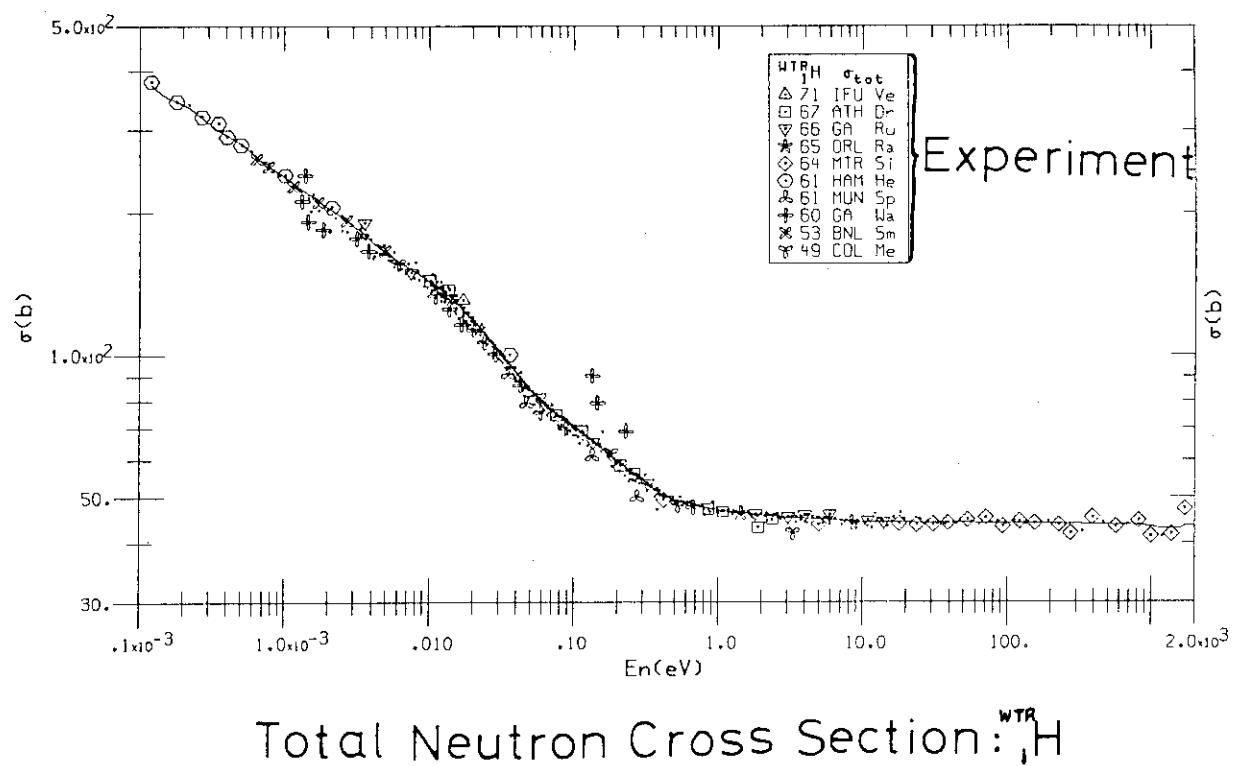
表 4.9-2 水蒸気による中性子損失 (%)

	水蒸気層厚さ (cm)				
	10	30	50	70	
湿度 (%)	30	0.11	0.33	0.55	0.16
	50	0.18	0.55	0.91	1.27
	70	0.26	0.76	1.27	1.77
	90	0.33	0.98	1.63	2.27

表 4.9-3 重水層による中性子損失 (%)

	重水層厚さ (mm)					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
中性子損失 (%)	3.8	7.4	10.9	14.3	17.5	20.6

Total Neutron Cross Section: $^{27}_{13}\text{Al}$ Total Neutron Cross Section: $^{40}_{40}\text{Zr}$ 図 4.9-1 $A\ell$ と Zr の中性子全断面積⁴⁾

図 4.9-2 水の水素の中性子全断面積⁴⁾

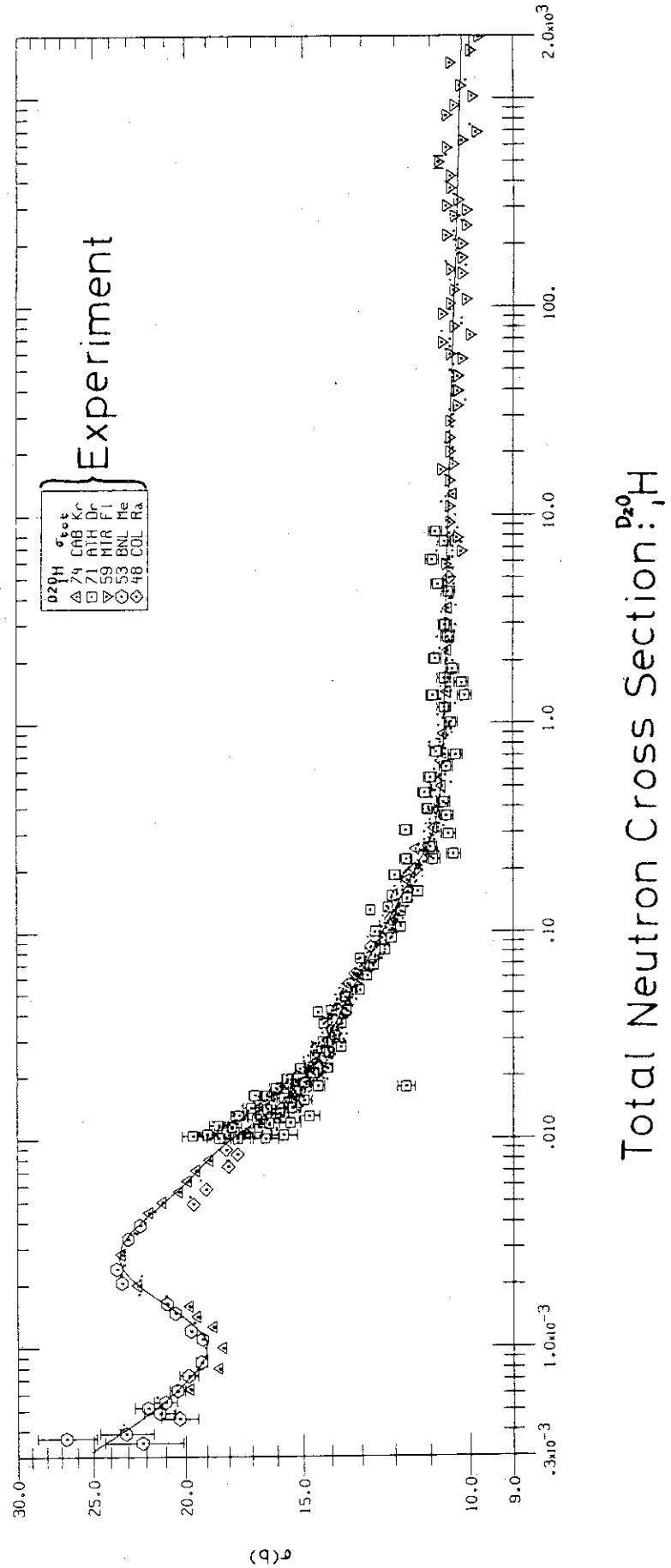
図 4.9-3 重水の水素の中性子全断面積⁴⁾

表 4.10-1 設計評価のまとめ

		T 1 導管 3 Å 中性子	C 1 導管 5 Å 中性子	C 3 導管 7 Å 中性子
理想的円弧の場合の収率		~88	~80	~76
中性子損失	反射率(0.99)によるもの	~6	~6	~7
	円弧多角形近似によるもの	~3	~4	~6
	中性子導管内によるもの	≤1	≤1.0	≤1.0
	接合誤差によるもの	C型接合誤差 (Gauss 分布を仮定した場合)	9.6	6.2
	損失合件	~20	~17	~18
収率期待値*		~68 ~78	~63 ~69	~58 ~62

(単位:百分率(%))

* ; 収率期待値は、接合誤差を考慮した場合と、しない場合で与えている。

5. 中性子分布

5.1 Maxwell 分布を仮定した導管出入口スペクトル

前章で中性子導管を伝播する中性子の収率と設計データの関係を検討した。この章で導管入口にMaxwell 分布を仮定して導管出口スペクトルを求める。出口スペクトルは、中性子収率と入ロスペクトルを乗じることによって得られる。中性子スペクトルを波長 λ を変数として表わすと、1に規格化した導管入ロ中性子束スペクトル $\phi_{in}(\lambda)$ は

$$\phi_{in}(\lambda) = 2 \left(\frac{h^2}{2mkT} \right)^2 \frac{1}{\lambda^5} \exp \left(-\frac{h^2}{2mkT} \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (5.1-1)$$

で与えられる。ここに h はプランク定数、 m は中性子質量、 k はボルツマン定数、 T は中性子が動きまわっている媒質の温度である。

$$\frac{h^2}{2mk} = 949.14 \text{ } (\text{A}^2 \cdot \text{K}) \quad (5.1-2)$$

導管を通る波長 λ の中性子収率を $I(\lambda)$ とすると、導管出口中性子スペクトル $\phi_{out}(\lambda)$ は

$$\phi_{out}(\lambda) = \phi_{in}(\lambda) \cdot I(\lambda) \quad (5.1-3)$$

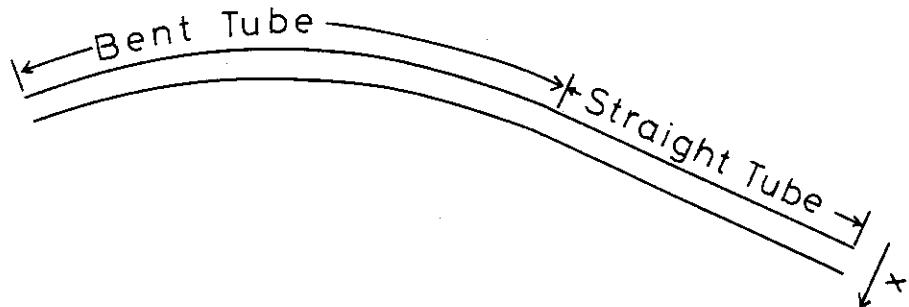
で与えられる。

表 2.2-1 の設計データに基づいて、入ロ中性子温度を T 1 導管で 293 K, C 1, C 3 導管で 20 K とし、出口スペクトルを求めた。図 5.1-1 に T 1 導管の入ロスペクトル、図 5.1-2 に C 1 導管、図 5.1-3 に C 3 導管の入ロスペクトルを示す。

5.2 導管内中性子空間分布

文献 2) の 2.2.2 節式 (2.2-19) や図 2.2-10 に示したように、曲導管内の位置 (外周反射面を $x = 0$ とし、内周反射面方向に x 軸をとる、図 5.2-1) によって中性子の強度が異なる。この節で、JRR-3 改造炉中性子導管について、数値解析によって導管出口中性子空間分布がどうなるのかを示す。曲導管内では、特性波長の中性子は外周反射面近傍に偏るが、直導管をつなげることによって空間分布が均一になる様子を数値解析で示す。計算では導管巾を 10 等分し、導管出口で各領域に入る中性子強度を求めた。空間分布は平均強度に対するその領域の強度の比で示す。空間分布の解析精度は、文献 2) の EL 3 炉や ORPHEE 炉の実測値との比較からわかるように ± 20 % である。

導管内中性子空間分布を計算した場所を図 5.2-2 に示す。図 5.2-3 に T 1 導管 2 A° 中性子の空間分布を、曲導管だけの時、8.5 m または 17.0 m の直導管をつないだ時、および 2.2-1 の

図 5.2-1 導管内座標軸 x

ベースケースの場合（直導管部 22 m）について示す。 2 \AA 中性子は特性波長であるから、曲管部では分布が外周反射面に偏っていることは文献 2) の図 2.2-10 でも示されている。直導管 8.5 m 後には、中性子は内周反射面に偏っている。直導管 17.0 m 後、ベースケースの直導管後にはほぼ均一に分布している。

図 5.2-4 と図 5.2-5 に C 1 導管 4 および 6 \AA 中性子空間分布を示す。 4 \AA は特性波長だから曲導管直後の分布は、T 1 導管の 2 \AA 中性子の空間分布と同じである。 4 \AA 中性子の直導管部 8.5 m, 17.0 m, ベースケース (20 m) での分布はほど同じで導管内で均一になっている。 6 \AA 中性子の場合、曲導管内でジグザグ伝播するから、曲導管出口ですでに均一分布している。

図 5.2-6 と図 5.2-7 に C 3 導管 6 および 10 \AA 中性子空間分布を示す。 6 \AA は特性波長だから、曲導管直後外周反射面に偏っているのがわかる。直導管部ではほど均一になっている。 10 \AA 中性子の場合、C 1 導管の 6 \AA 中性子と同じく、曲導管直後で均一になっている。

5.3 導管出口中性子角度分布

この節で、導管出口の中性子角度分布を示しておく。導管出口の中性子射出角度の符号を図 5.3-1 に示すようにとる。波長に対応した臨界角を θ_c とすると、 $2\theta_c$ を 10 等分し、場所によらず各角度領域に入ってくる中性子強度を求め、平均強度と各領域の強度の比で分布を表わした。5.2 節と同じく、曲導管直後の角度分布および直導管を通った後の分布を求めた。

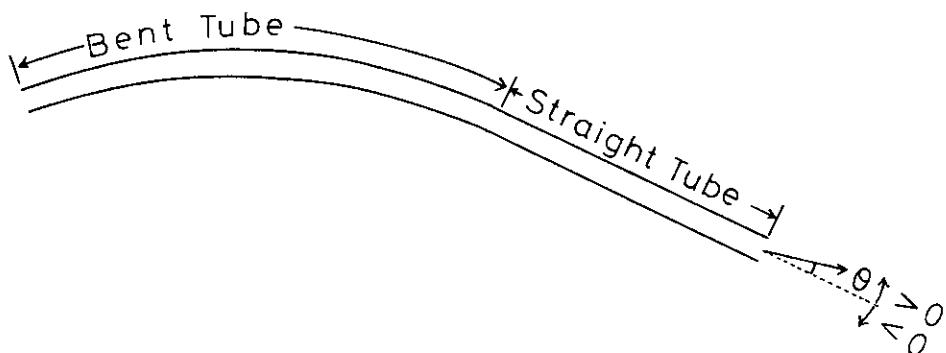


図 5.3-1 導管出口角度

図 5.3-2 は T 1 導管 2 Å 中性子導管出口角度分布である。曲導管出口では $\theta = 0$ をピークにした分布をしている。5.2 節の空間分布において、曲導管直後は外側反射面に偏っていたから、曲導管を出た後は、その接線方向に強度のピークをもつビームになる。直導管出口においては、8.5 m およびベースケースの直導管後は正の角度方向、17.0 m 後は負の角度方向に分布している。

図 5.3-3 は C 1 導管 4 Å 中性子導管出口角度分布である。4 Å は C 1 導管の特性波長であり曲導管直後の角度分布は、T 1 導管の 2 Å 中性子と同じで $\theta = 0$ にピークをもつ分布である。直導管を通った後は分布がひろがり、幾分負の角度方向の分布が多くなっている。図 5.3-4 は C 1 導管の 6 Å 中性子角度分布を示す。曲導管においてジグザク伝播するから角度分布は、曲導管出口、直導管出口とも同じく一様に広がっている。

図 5.3-5 と図 5.3-6 は C 3 導管の 6 Å および 10 Å 中性子の角度分布を示す。6 Å は特性波長だから、曲導管出口では $\theta = 0$ にピークをもつ分布になる。直導管を通った後は、 $\theta = 0$ 以外に分散した分布になる。10 Å 中性子では、曲導管出口で $\theta = 0$ 以外にピークをもつ分散した分布になっている。

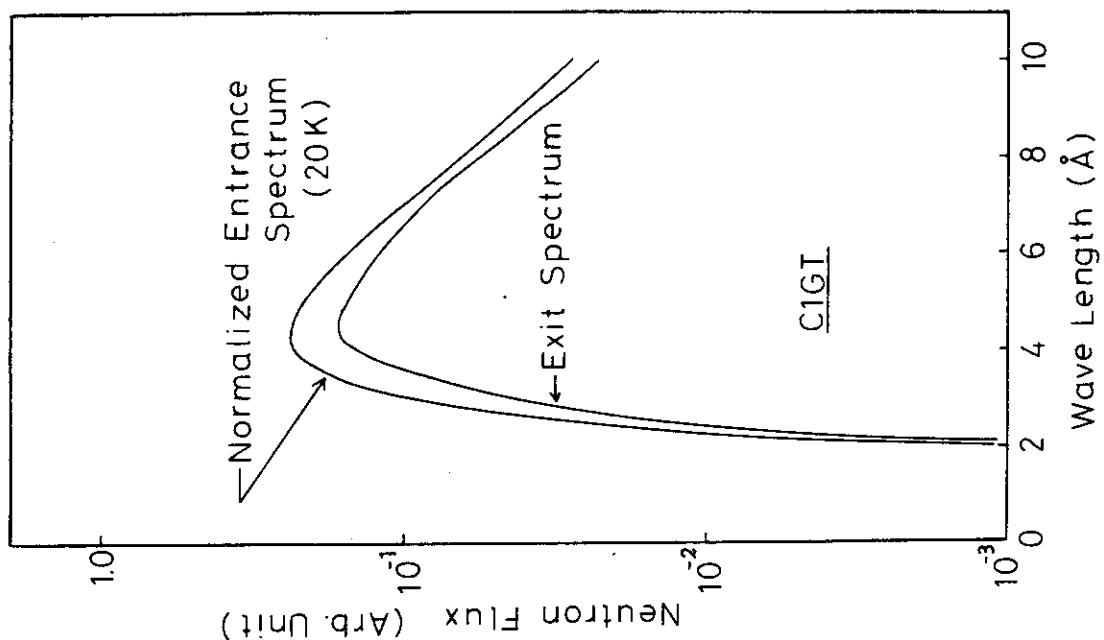


図 5.1-2 C1導管入出ロスペクトル

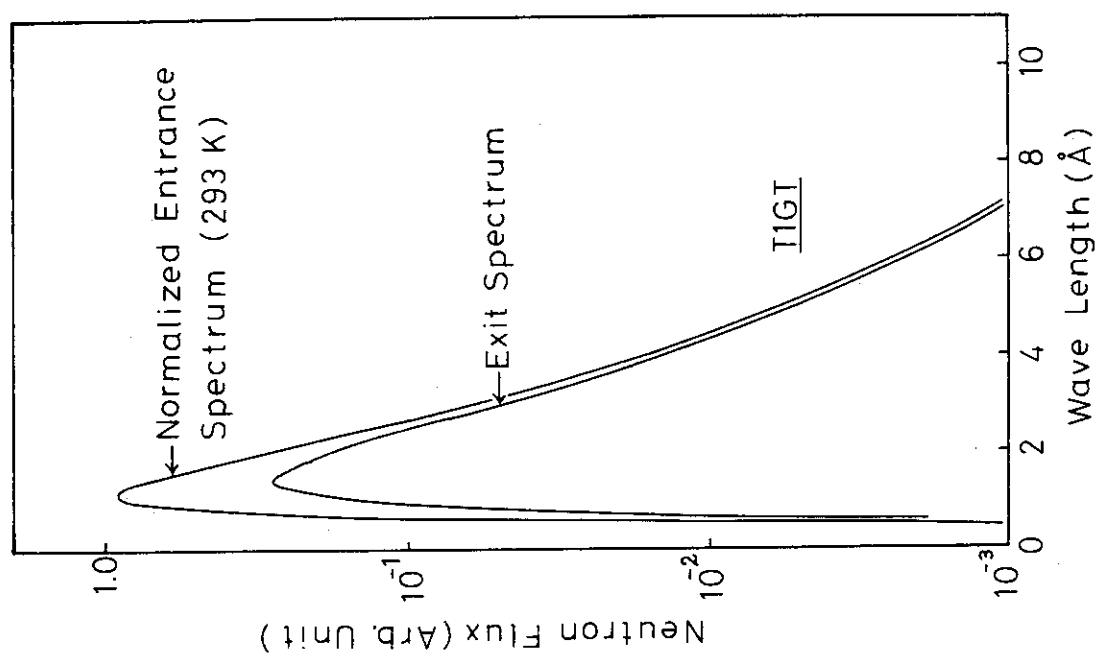


図 5.1-1 T1導管入出ロスペクトル

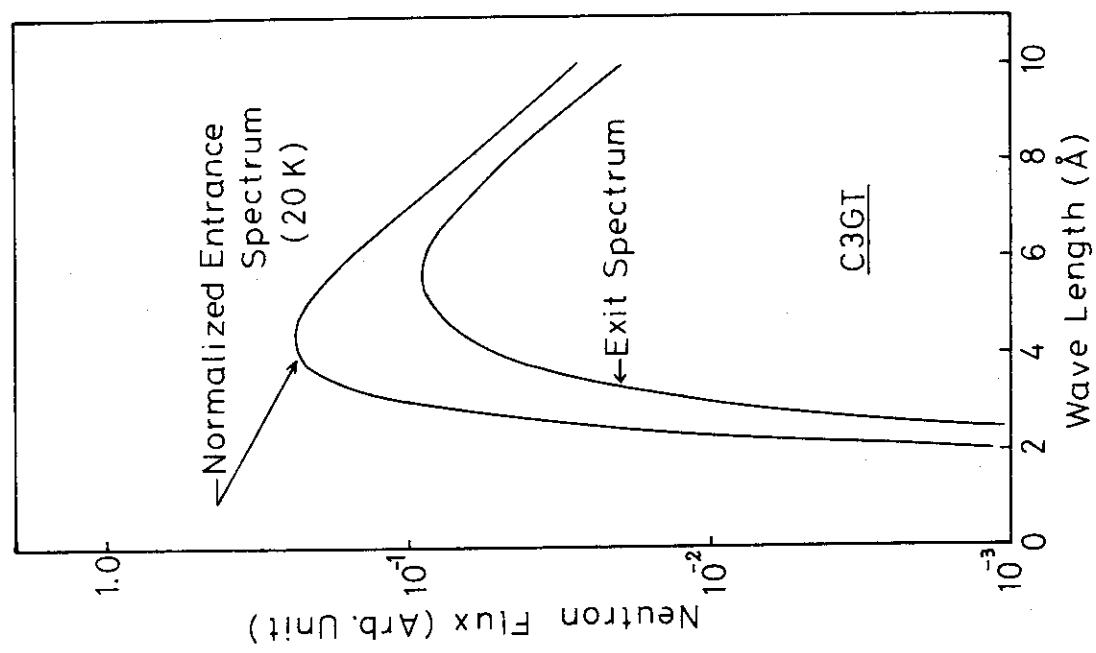


図 5.1-3 C 3導管入出ロスペクトル

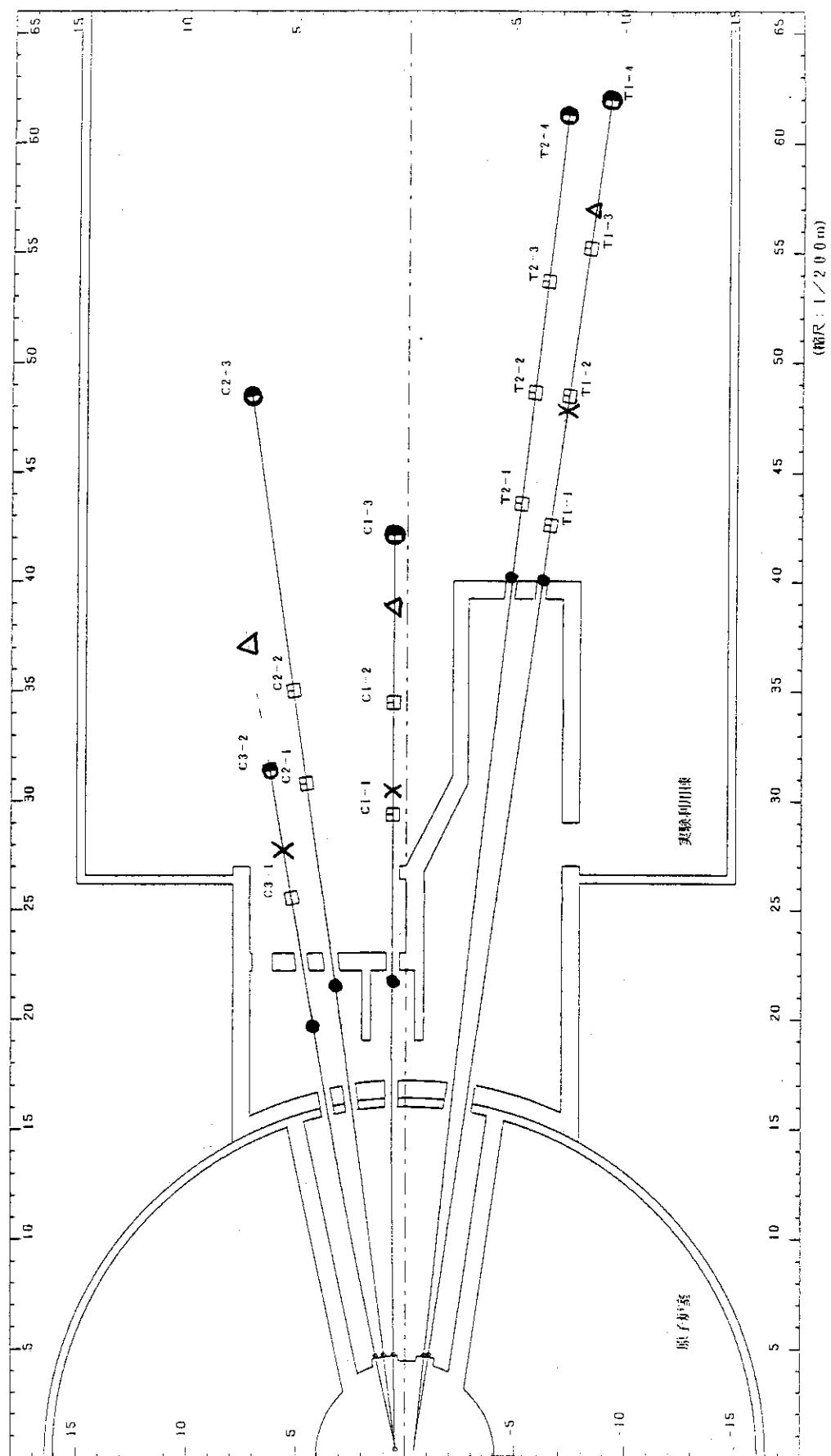
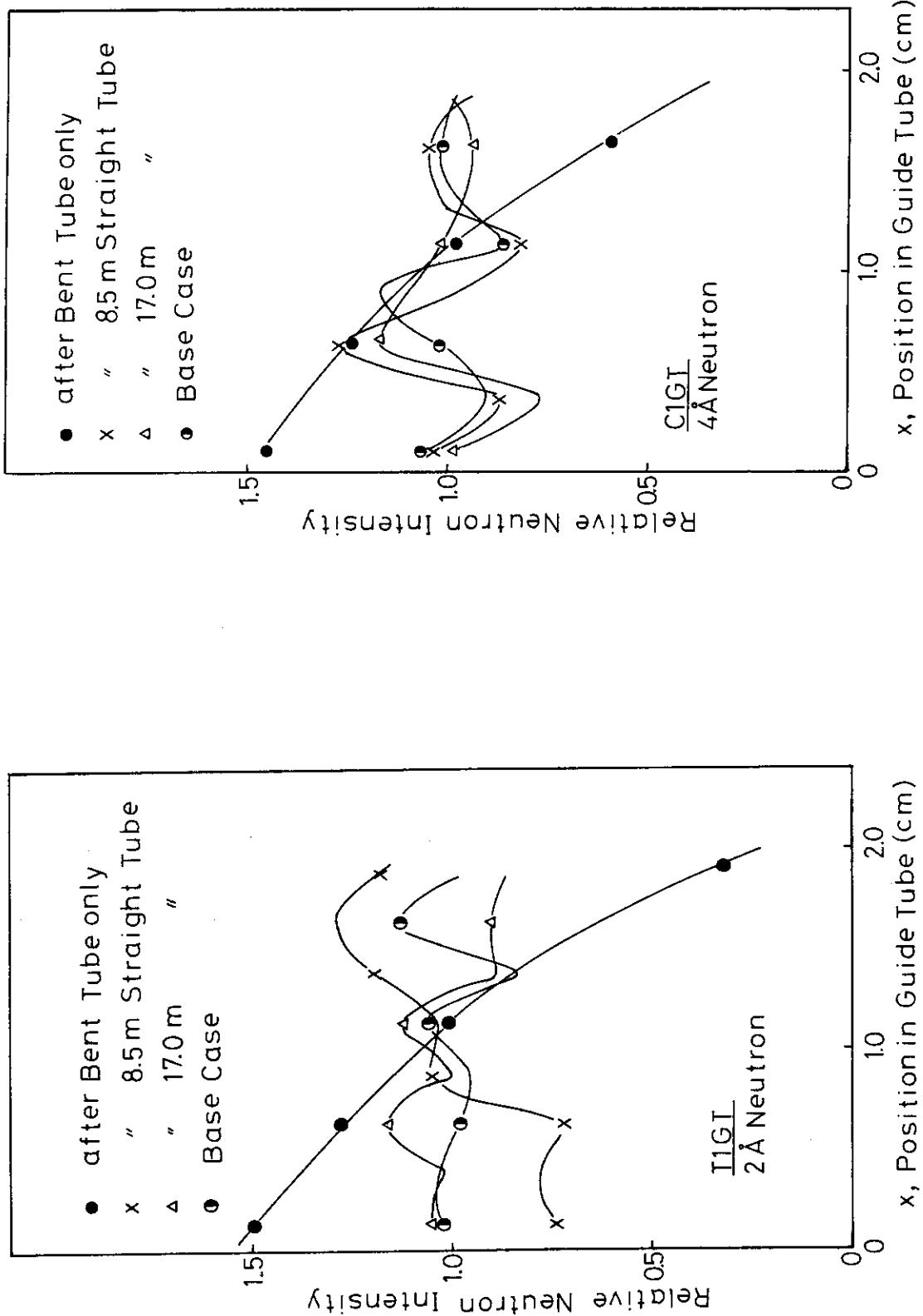


図 5.2-2 直導管部中性子空間分布計算位置
 × : 曲導管後 8.5 m 位置 ● : 曲導管終端
 ○ : ベースケーブル直導管終端
 △ : 直導管後 17.0 m 位置

図 5.2-4 C1 導管 : 4\AA 中性子導管内空間分布図 5.2-3 T1 導管 : 2\AA 中性子導管内空間分布

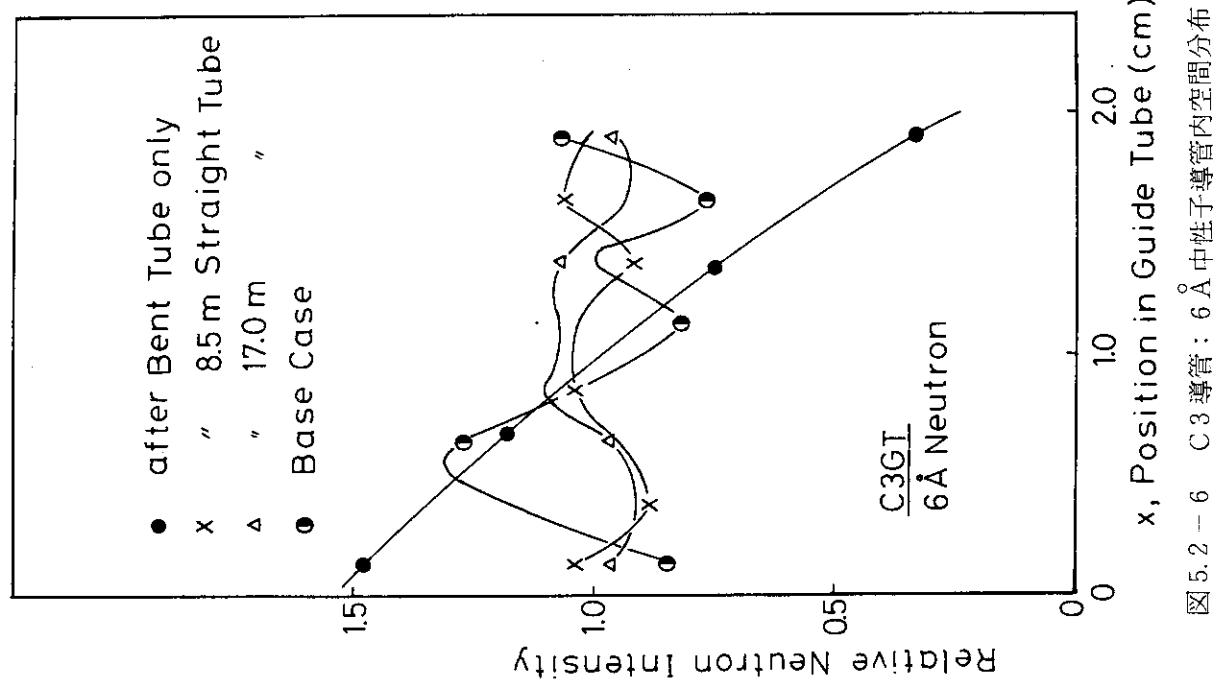


図 5.2-6 C3導管：6 Å 中性子導管内空間分布

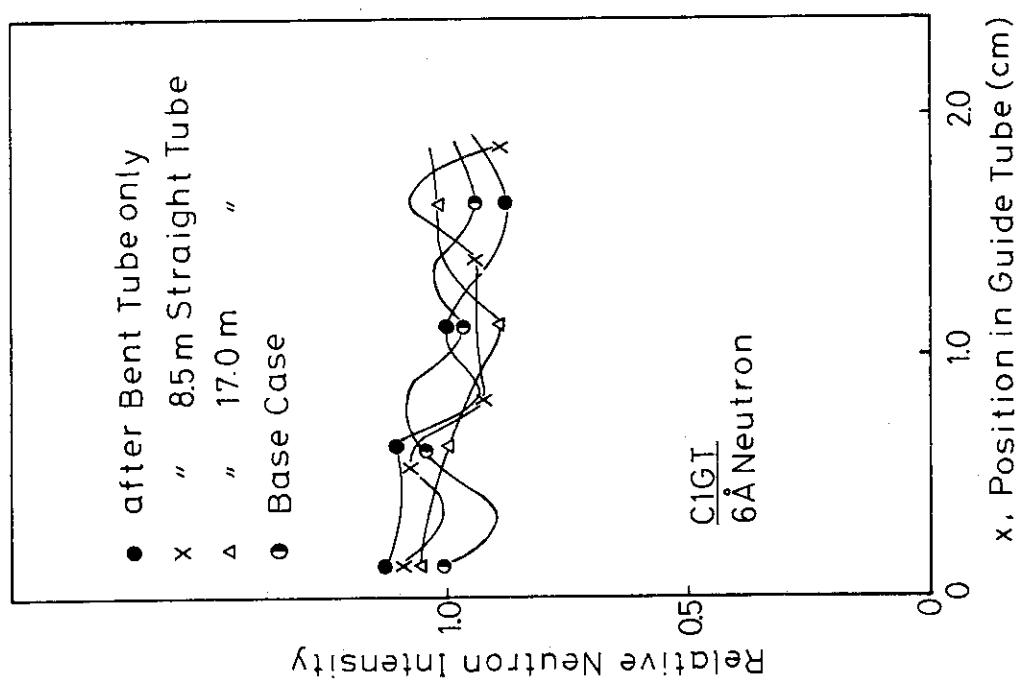
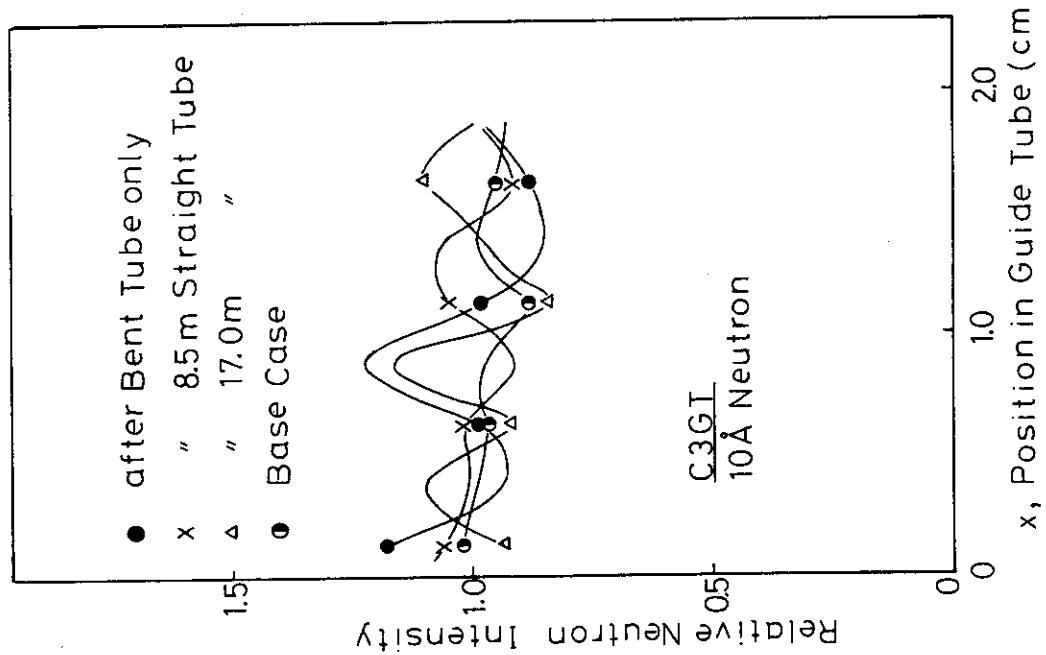
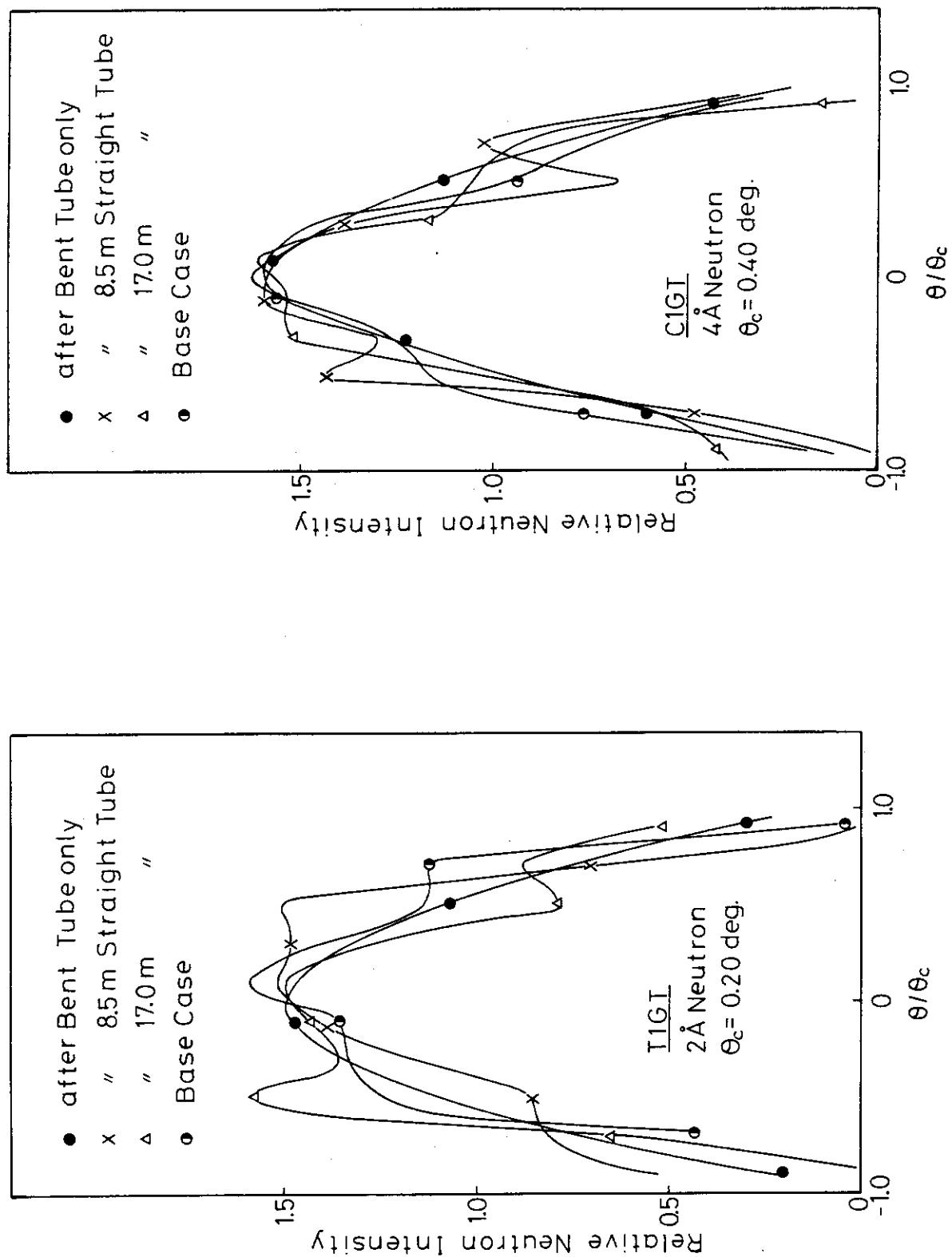
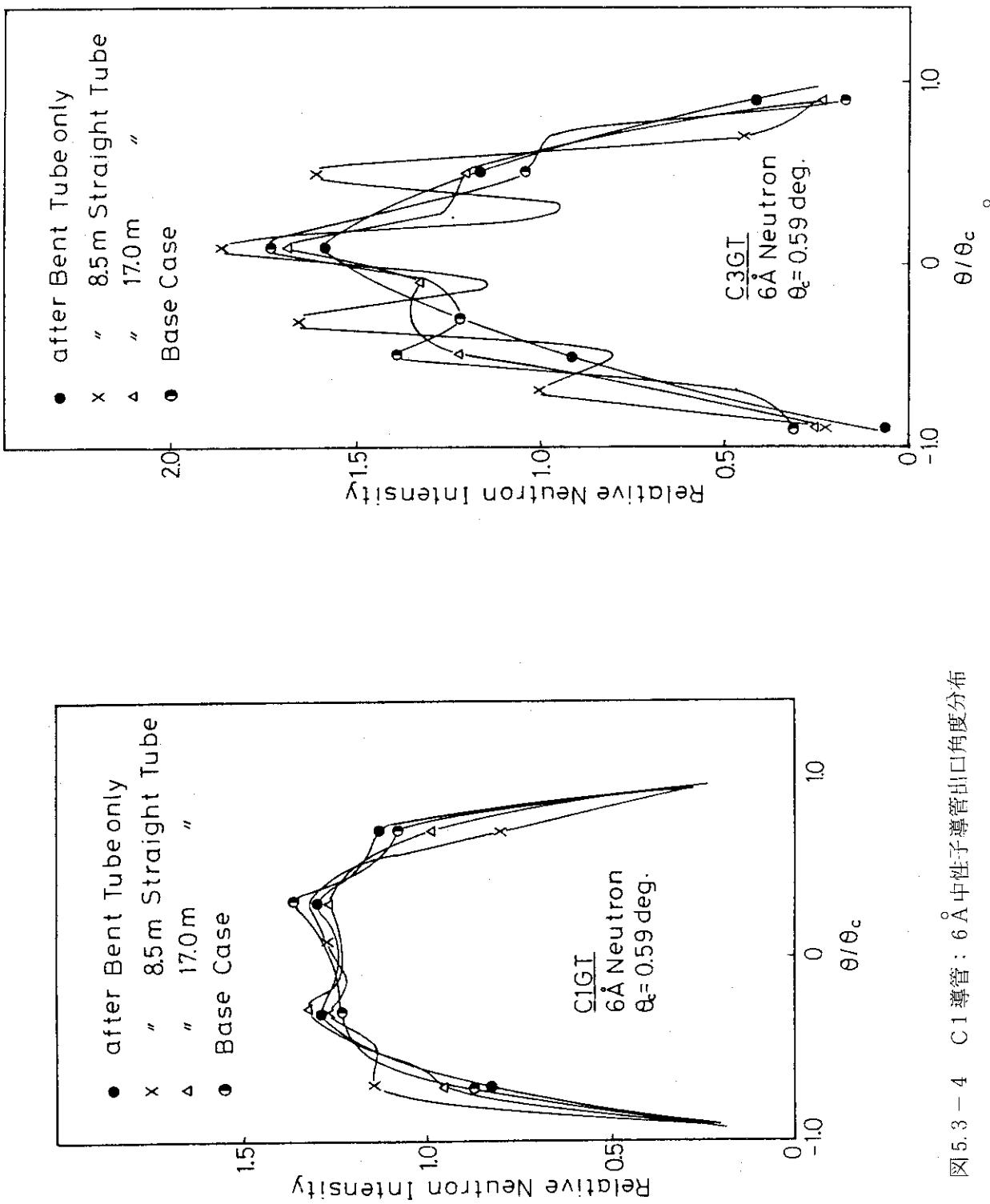


図 5.2-5 C1導管：6 Å 中性子導管内空間分布

図 5.2-7 C3 導管 : 10\AA 中性子導管内空間分布

図 5.3-3 C1 导管: 4\AA 中性子の導管出口角度分布図 5.3-2 T1 导管: 2\AA 中性子の導管出口角度分布

図 5.3-4 C1導管: 6\AA 中性子導管出口角度分布図 5.3-5 C3導管: 6\AA 中性子導管出口角度分布

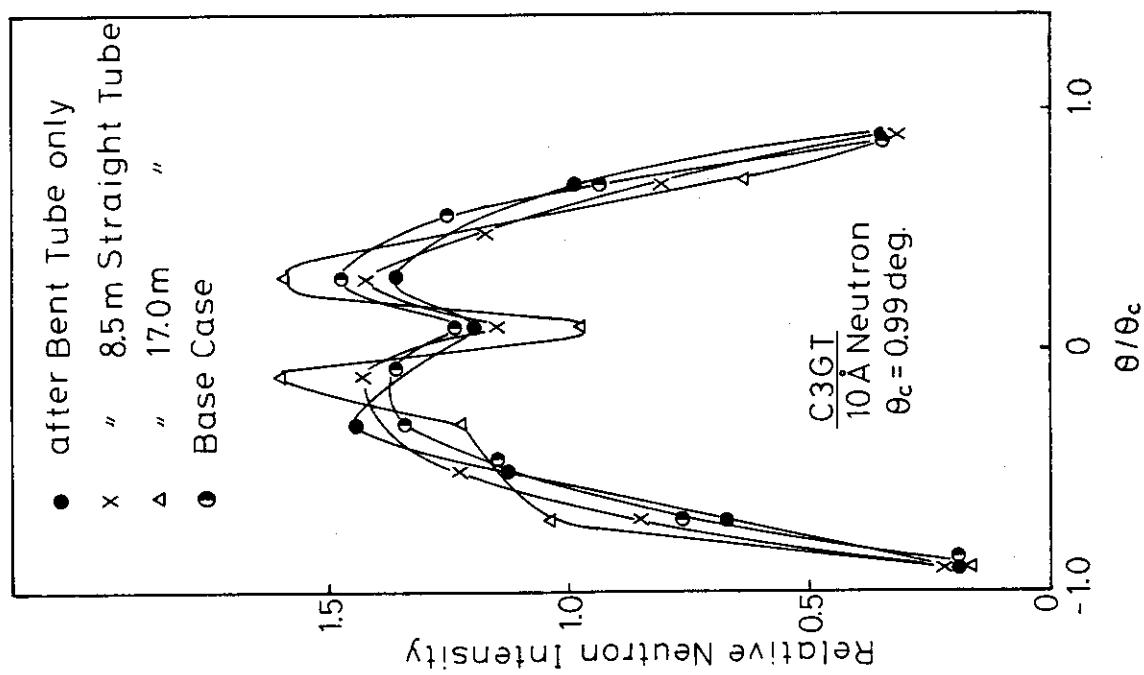


図 5.3-6 C3導管：10Å中性子導管出口角度分布

6. 結 言

本報告において、JRR-3 改造炉に設置予定の導管群について、設計データ（導管の寸法、ニッケル薄膜厚さ、反射率等）の中性子収率への影響をパラメトリックに解析を行い、導管の設計評価を行った。接合誤差の影響を入れない場合、T 1 導管（3 Å 中性子）で 78 %, C 1 導管（5 Å 中性子）で 69 %, C 3 導管（7 Å 中性子）で 62 % の収率を得た。これは現設計で得られる optimum な評価である。接合誤差があると収率は低下するから、導管据付け方法を検討し、注意深く据え付けねばならない。

現設計に基づいて、導管出口スペクトル、導管内中性子空間分布、導管出口角度分布をも求めた。

謝 辞

本報告を作成するに当り、原子炉安全工学部部長（前研究炉管理部次長）佐藤一男氏、主任研究員大西信秋氏、研究炉開発室利用グループリーダー高橋秀武氏、川端祐司氏および関係諸氏に深く感謝する。物理部主任研究員船橋達氏、および京都大学原子炉実験所助手海老沢徹氏には終始御助言をいただき深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 原見太幹, 植村睦, 海老沢徹 「JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(I) 中性子導管収率解析プログラム NEUGT の開発 (マニュアル)」 JAERI-M 85-092 (1985)
- 2) 原見太幹, 川端祐司 「JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(II) 中性子導管の基本的特性と NEUGT プログラムの検証計算」 JAERI-M 85-093 (1985)
- 3) B. Alefeld, J. Christ, D. Kukla, R. Scherm and W. Schmatz, "Neutron Guides a Report on the Present State of Development", Rep. Jü1-294-NP (1965), AERE. TRANS. 1074.
- 4) D.I. Garber and R.R. Kinsey, "Neutron Cross Sections Volume II, Curves", BNL325 (1976).
- 5) 東京天文台編 理科年表, 丸善株式会社 (1984)

6. 結 言

本報告において、JRR-3 改造炉に設置予定の導管群について、設計データ（導管の寸法、ニッケル薄膜厚さ、反射率等）の中性子収率への影響をパラメトリックに解析を行い、導管の設計評価を行った。接合誤差の影響を入れない場合、T 1 導管（3 Å 中性子）で 78 %, C 1 導管（5 Å 中性子）で 69 %, C 3 導管（7 Å 中性子）で 62 % の収率を得た。これは現設計で得られる optimum な評価である。接合誤差があると収率は低下するから、導管据付け方法を検討し、注意深く据え付けねばならない。

現設計に基づいて、導管出口スペクトル、導管内中性子空間分布、導管出口角度分布をも求めた。

謝 辞

本報告を作成するに当り、原子炉安全工学部部長（前研究炉管理部次長）佐藤一男氏、主任研究員大西信秋氏、研究炉開発室利用グループリーダー高橋秀武氏、川端祐司氏および関係諸氏に深く感謝する。物理部主任研究員船橋達氏、および京都大学原子炉実験所助手海老沢徹氏には終始御助言をいただき深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 原見太幹, 植村睦, 海老沢徹 「JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(I) 中性子導管収率解析プログラム NEUGT の開発(マニュアル)」 JAERI-M 85-092 (1985)
- 2) 原見太幹, 川端祐司 「JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(II) 中性子導管の基本的特性と NEUGT プログラムの検証計算」 JAERI-M 85-093 (1985)
- 3) B. Alefeld, J. Christ, D. Kukla, R. Scherm and W. Schmatz, "Neutron Guides a Report on the Present State of Development", Rep. Jü1-294-NP (1965), AERE. TRANS, 1074.
- 4) D.I. Garber and R.R. Kinsey, "Neutron Cross Sections Volume II, Curves", BNL325 (1976).
- 5) 東京天文台編 理科年表, 丸善株式会社 (1984)

6. 結 言

本報告において、JRR-3 改造炉に設置予定の導管群について、設計データ（導管の寸法、ニッケル薄膜厚さ、反射率等）の中性子収率への影響をパラメトリックに解析を行い、導管の設計評価を行った。接合誤差の影響を入れない場合、T 1 導管（3 Å 中性子）で 78 %, C 1 導管（5 Å 中性子）で 69 %, C 3 導管（7 Å 中性子）で 62 % の収率を得た。これは現設計で得られる optimum な評価である。接合誤差があると収率は低下するから、導管据付け方法を検討し、注意深く据え付けねばならない。

現設計に基づいて、導管出口スペクトル、導管内中性子空間分布、導管出口角度分布をも求めた。

謝 辞

本報告を作成するに当り、原子炉安全工学部部長（前研究炉管理部次長）佐藤一男氏、主任研究員大西信秋氏、研究炉開発室利用グループリーダー高橋秀武氏、川端祐司氏および関係諸氏に深く感謝する。物理部主任研究員船橋達氏、および京都大学原子炉実験所助手海老沢徹氏には終始御助言をいただき深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 原見太幹, 植村睦, 海老沢徹 「JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(I) 中性子導管収率解析プログラム NEUGT の開発 (マニュアル)」 JAERI-M 85-092 (1985)
- 2) 原見太幹, 川端祐司 「JRR-3 改造炉中性子導管詳細設計(II) 中性子導管の基本的特性と NEUGT プログラムの検証計算」 JAERI-M 85-093 (1985)
- 3) B. Alefeld, J. Christ, D. Kukla, R. Scherm and W. Schmatz, "Neutron Guides a Report on the Present State of Development", Rep. Jü1-294-NP (1965), AERE. TRANS. 1074.
- 4) D.I. Garber and R.R. Kinsey, "Neutron Cross Sections Volume II, Curves", BNL325 (1976).
- 5) 東京天文台編 理科年表, 丸善株式会社 (1984)