

JAERI - M
84-047

JT-60分光計測用機器の耐放射線性試験
(臨界プラズマ試験装置設計報告・126)

1984年3月

西谷 健夫・杉江 達夫・田中 隆一・中村 義輝
平尾 敏雄・金子 哲*・森 治通*・山下 貴司*
金原 政男*・永田 浩**・松本 明**・中澤 正治***
前田 彦祐

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、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

JT-60 分光計測用機器の耐放射線性試験
(臨界プラズマ試験装置設計報告・126)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
西谷健夫・杉江達夫・田中隆一⁺・中村義輝⁺
平尾敏雄⁺・金子 哲^{*}・森 治通^{*}・山下貴司^{*}
金原政男^{*}・永田 浩^{**}・松本 明^{**}
中澤正治^{***}・前田彦祐

(1984年1月31日受理)

JT-60の分光計測を構成する部品の内、光電子増倍管、シリコンフォトダイオード、回路系(アナログ回路、デジタル回路)、ガラス面板、ミラー、回折格子、光学ガラスについて γ 線照射試験と光学ガラスの中性子照射試験を行った。

γ 線の照射線量率は $10^2 \sim 10^5$ R/hで、照射線量は $10 \sim 10^5$ Rであり、中性子については 10^{12} n/cm²程度であった。

光電子増倍管とシリコンフォトダイオードは γ 線に対し感度を有し、さらに光電子増倍管は照射により暗電流が増加することがわかった。アナログ回路は照射中も正常に動作したが、デジタル回路では 10^5 R/hでカウンタが破損した。ガラス面板では、石英ガラスが γ 線の影響が最も少いことがわかった。ミラーおよび回折格子には照射の影響がみられなかった。光学ガラスについては、 γ 線による着色が少ないノンブラウンガラスが中性子照射に対しても着色が少ないことがわかった。

⁺ 高崎研究所開発部

^{*} 浜松フォトニクス(株)

^{**} 日本光学工業(株)

^{***} 東京大学

Irradiation Effects on Components of Spectroscopic
Measurement Device for JT-60 Diagnostics

Takeo NISHITANI, Tatsuo SUGIE, Ryuichi TANAKA⁺,
Yoshiteru NAKAMURA⁺, Toshio HIRAO⁺, Satoru KANEKO^{*},
Harumichi MORI^{*}, Takaji YAMASHITA^{*}, Masao KINPARA^{*},
Hiroshi NAGATA^{**}, Akira MATSUMOTO^{**}, Masaharu NAKAZAWA^{***},
and Hikosuke MAEDA

Department of Large Tokamak Development
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1984)

Irradiation effects on photomultiplier tubes, silicon photodiodes, electronics, glass plates, mirrors, gratings and optical glasses, which are components of spectroscopic measurements for JT-60 diagnostics, are investigated. They are exposed by γ -rays at exposure rate 10^2 up to 10^5 R/h and optical glasses are irradiated by neutrons at about 10^{12} n/cm².

Photomultipliers and silicon photodiodes have undesirable large efficiencies for γ -ray detection, and the former's dark currents increase by irradiation. An analog circuit operates normally under the γ -ray exposure rate up to 10^5 R/h, but a counter device in the digital circuit are broken down at exposure rate 10^5 R/h. No irradiation effect is found in mirrors and gratings after 4×10^4 R exposure. In irradiation experiments of γ -rays and neutrons, nonbrown glasses are not colored.

Keywords : JT-60, Spectroscopic Measurement, Diagnostics, Irradiation
Effect, γ -ray, Neutron, Photomultiplier Tubes, Silicon
Diodes, Glass Plates, Optical Glass

+ Department of Development, Takasaki, JAERI

* Hamamatsu Photonics Co., Ltd.

** Nippon Kogaku K.K.

*** University of Tokyo

目 次

1. はじめに	1
2. JT - 60 分光計測 (不純物挙動診断システム) の概要	2
3. JT - 60 分光計測用検出器の ^{60}Co γ 線照射試験	8
3.1 概 要	8
3.2 試験の概要	8
3.3 測定と結果	9
3.3.1 光電子増倍管の測定と結果	9
3.3.2 シリコンフォトダイオードの測定と結果	10
3.3.3 回路系の測定と結果	11
3.3.4 ガラス面板の測定と結果	11
3.4 考 察	12
4. JT - 60 分光計測用ミラー及び回折格子の ^{60}Co γ 線照射試験	28
4.1 概 要	28
4.2 測定と結果	28
4.2.1 $\text{Al} + \text{Mg F}_2$ ミラーの測定及び結果	28
4.2.2 回折格子の測定及び結果	29
4.3 考 察	30
5. JT - 60 計測用光学ガラスの中性子照射試験	33
5.1 概 要	33
5.2 試験及び構成	33
5.2.1 照射試料	33
5.2.2 照射方法	33
5.2.3 測定方法	34
5.3 実験結果	34
5.4 考 察	34
6. まとめ	45
謝 辞	45
参考文献	46

Contents

1.	Introduction	1
2.	Outline of the JT-60 spectroscopic measurement device (impurity diagnostic system)	2
3.	Irradiation experiment of ^{60}Co γ -rays on the detectors for the JT-60 spectroscopic measurement	8
3.1	Introduction	8
3.2	Outline of the experiment	8
3.3	Measurements and results	9
3.3.1	Measurements and results for photomultiplier tubes	9
3.3.2	Measurements and results for silicon photodiodes	10
3.3.3	Measurements and results for electronic circuits	11
3.3.4	Measurements and results for glass plates	11
3.4	Discussion	12
4.	Irradiation experiment of ^{60}Co γ -rays on the mirrors and the gratings for the JT-60 spectroscopic measurement	28
4.1	Introduction	28
4.2	Measurements and result	28
4.2.1	Measurements and results for Al + MgF ₂ mirrors	28
4.2.2	Measurements and results for gratings	29
4.3	Discussion	30
5.	Neutron irradiation experiment on optical grasses for the JT-60 diagnostics	33
5.1	Introduction	33
5.2	Experiment	33
5.2.1	Sample of irradiation	33
5.2.2	Method of irradiation	33
5.2.3	Method of measurement	34
5.3	Experimental results	34
5.4	Discussion	34
6.	Conclusion	45
	Acknowledgements	45
	References	46

1. はじめに

トカマクプラズマの分光計測は、混入不純物の定量やスペクトル線のドップラー幅を利用したプラズマイオン温度の測定を目的としており、重要なプラズマ診断法の1つである。

JT-60ではD-T反応は行なわないが、逃走電子モード時に高エネルギーのいわゆる硬X線や、 (γ, n) 反応による中性子が発生することが予想されている。分光計測において、窓や回折格子といった部品は直接プラズマを見込んでおり、プラズマからの放射線の影響を受けやすい。また光電子増倍管やフォトダイオードアレイなどの光検出器は直接にはプラズマを見込んでいないが、光検出器自体、光子に敏感であるため、検出装置の壁を透過して入射してくる放射線が誤信号となる恐れがあり、さらに長期間の線量の蓄積は、これらの光検出器の特性の劣化をもたらす可能性がある。

本報告では、JT-60分光計測で光検出器として使用する光電子増倍管(PMT)とシリコンフォトダイオード(SPD)について γ 線に対する感度や暗電流、分光感度などの特性変化の測定を行った。またこれらの光検出器に必要な回路系について γ 線照射下での動作状態について調べた。さらに γ 線によるPMTのガラス管の光学的特性の変化を見るため、 γ 線照射によるガラス面板の透過率変化の測定を行った。

光検出器以外の光学素子としては、回折格子とミラーについては γ 線照射による特性変化の測定を行った。また光学ガラスは窓材やレンズ材として重要な光学素子の一つであるが、光学ガラスの γ 線照射特性は以前からよく調べられており γ 線による影響の少ない光学ガラスを開発されている。そこでここではこれまでデータがほとんど無かった、中性子照射による光学ガラスの透過率変化の測定を行った。

構成としては、本章で、本報告の概要を述べ、II章では、JT-60における分光計測の概要を紹介する。III章では、光検器の γ 線照射試験として、PMT、SPD、回路系、ガラス面板の γ 線照射試験の結果について述べる。IV章では、回折格子およびミラーの γ 線照射試験、V章では光学ガラスの中性子照射試験について述べ、VI章でまとめを行った。

なお本報告の各章の執筆担当は以下のとおりである。

- I章 西谷 健夫
- II章 杉江 達夫
- III章 金子 哲, 森 治道, 山下 貴司, 金原 政男
- IV章 永田 浩
- V章 西谷 健夫
- VI章 西谷 健夫

2. JT-60分光計測(不純物挙動診断システム)の概要

JT-60 分光計測 (不純物挙動診断システム) の目的は、

- 1) 不純物および動作ガス (JT-60 の場合は水素) からの放射量の計測: 原子及びプラズマ素過程のモデルを使い, 放射損失量, 不純物量, 不純物のプラズマ中での挙動を診べる。
- 2) 不純物および動作ガスをプラズマパラメータ計測のプロープとして利用すること: スペクトル線のドプラー巾よりイオン温度を求め, スペクトル線の強度比より電子温度等を求める。
- 3) 原子分子物理への寄与: 未知スペクトル線の固定等。
- 4) JT-60 実時間プラズマ制御のためのセンサー。

等であると考えられる。(文献 8 参照)

JT-60 では壁の材料であるチタン (Ti), モリブデン (Mo), ニッケル (Ni) や, 壁に吸着している酸素 (O), 炭素 (C) 等が主な不純物としてプラズマ中に混入すると考えられる。また, プラズマの温度はプラズマ中心で, 10~20 keV になると考えられ, それにともなって Ti, Mo, Ni 等の金属不純物の高電離スペクトル線の共鳴線が, 0.5~10 Å の所で発光すると考えられる。そのため, この不純物挙動診断システムは, X 線域から近赤外域までを測定対象としており, その中の a~g までの各サブシステムの測定波長領域は図 2.1 のようになっている。これらの各サブシステムの概要を以下に述べる。

- A-4-a 空間分解軽元素不純物測定サブシステム: 小型ユニット化した分光器が約 30 個並べられる構造をしており, プラズマ 1 放電中に, 5~500 Å の波長域のスペクトル線のプラズマ中での発光の空間分布を測定するものである。図 2.2 に分光器ユニットの概略図を, 図 2.3 にそれを装着した様子を示した。
- A-4-b 軽元素ドプラー幅測定サブシステム: 不純物スペクトル線のドプラー幅を真空紫外域直入射分光器, 多チャンネル検出器を使って測定するものである。(1000 Å ~ 2500 Å 程度の不純物スペクトル線を測定対象としている。)
- A-4-c 重金属ドプラー幅測定サブシステム: 不純物スペクトル線のドプラー幅を結晶分光器, 多チャンネル検出器を使って測定するものである。(0.6 Å ~ 3 Å 程度の不純物スペクトル線を測定対象としている。)
- A-4-d 磁気リミタ部不純物測定サブシステム: 小型ユニット化した分光器 2 個が並べられており 20 Å ~ 1200 Å の波長域のスペクトル線の磁気リミタ部付近の発光を多チャンネル検出器を使って計測するものである。
- A-4-e, f 可視域, 斜入射域絶対測光基準サブシステム: この両サブシステムは従来の可視分光器と斜入射分光器で, 主に A-4 システムの感度校正のために利用される。
- A-4-g A-4 システム校正装置: 機器校正のための光源等である。
- これらのサブシステムには, プラズマ 1 放電中に必要なデータを取ることから多チャンネル

ル検出器を使用する。(ただし, e, f は従来の光電子増倍管を使用する。)この多チャンネル検出器は図 2.4 に示すように, 光を MCP (マイクロチャンネルプレート) で電子に変換し増幅を行い, 蛍光面で電子から光に変換し, ファイバープレートを通して PCD (プラズマ・カップルド・デバイス) センサーに導き回路系を通してビデオ信号として取出すものである。これらのサブシステムおよび検出器等は図 2.5 に示すように配置され, JT-60 本体より発生する X 線放射等にさらされることになり, 前もって影響を知り, 対策を施すことが必要である。

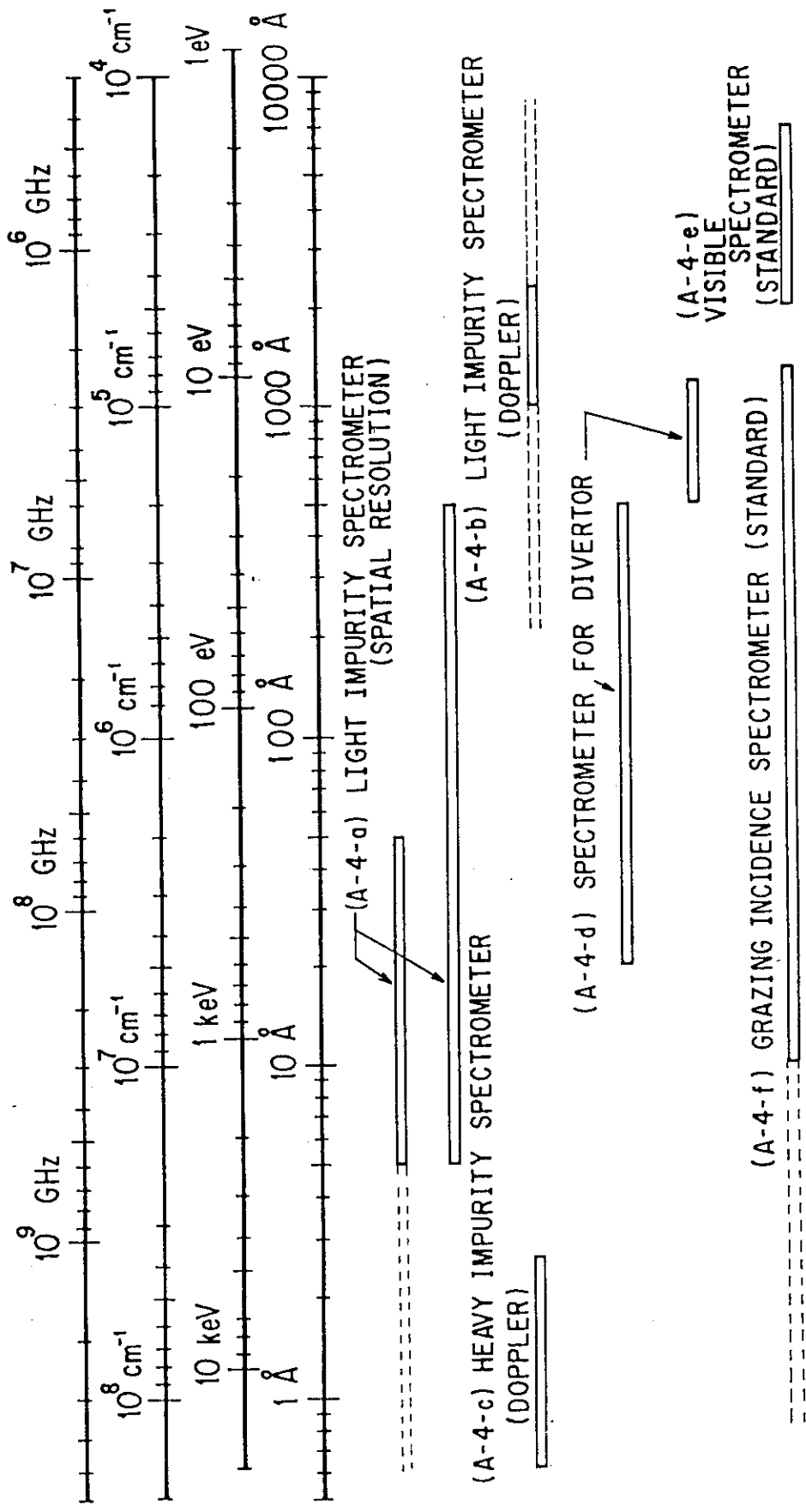


図 2.1 JT-60 不純物挙動診断システム各サブシステムの測定波長域

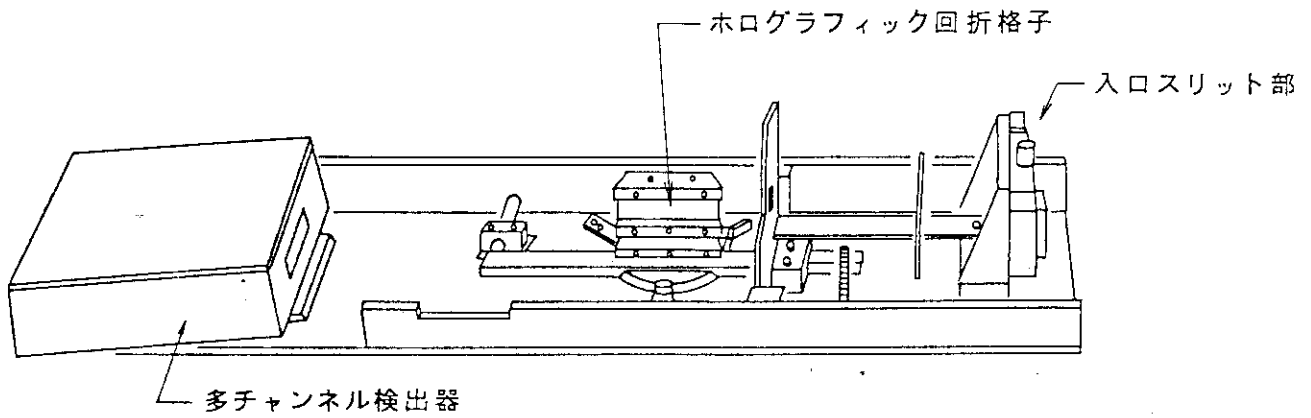


図 2.2 JT-60 で使用する分光器ユニットを装着した例

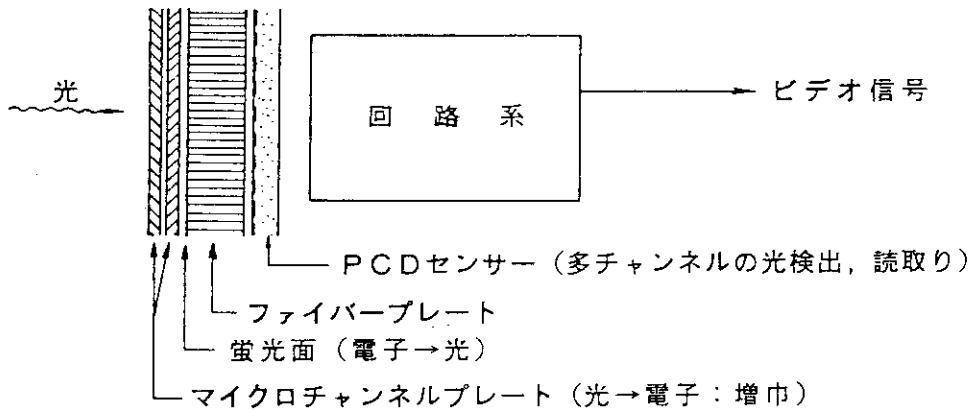


図 2.4 JT-60 で使用する多チャンネル検出器の構造

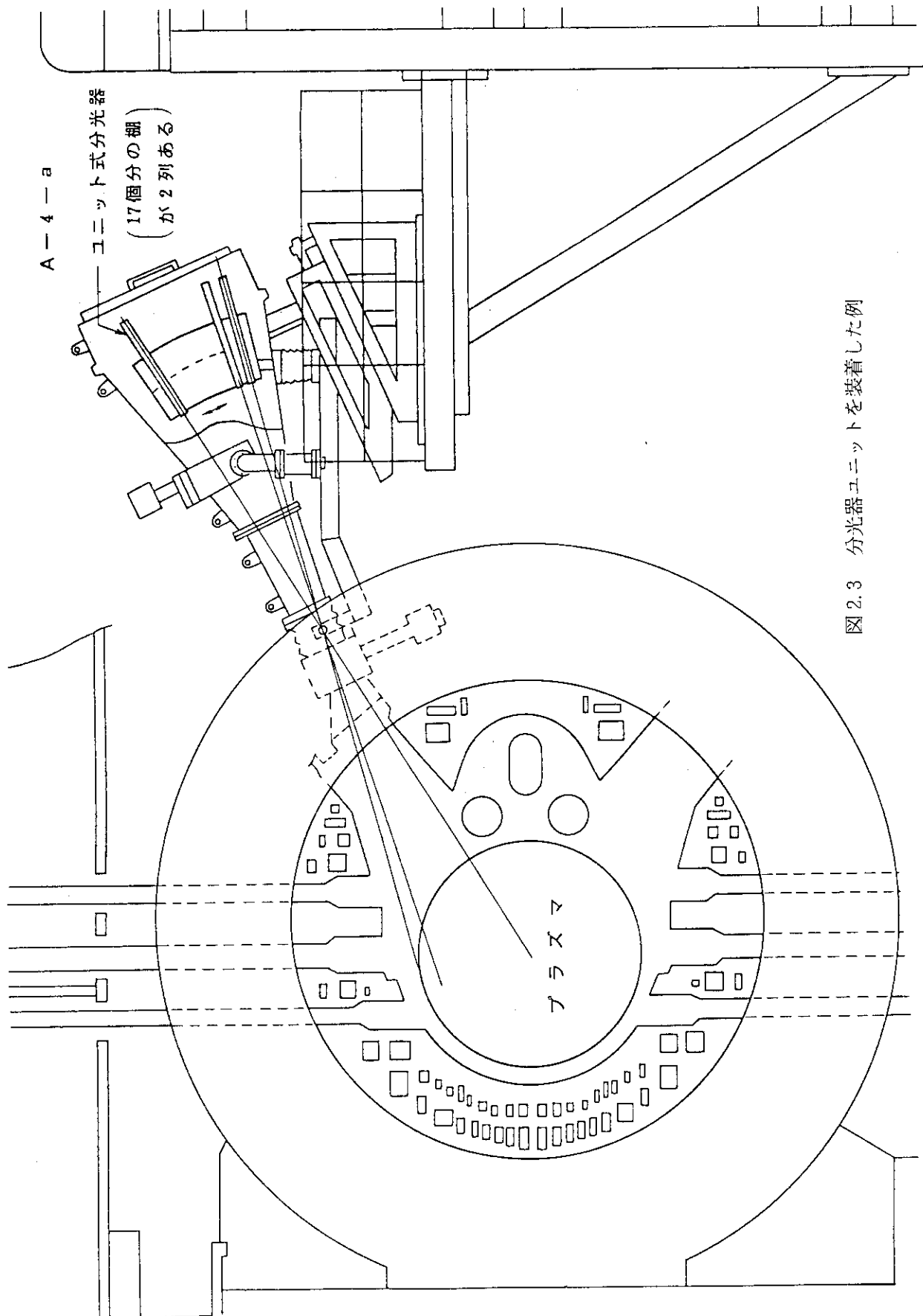
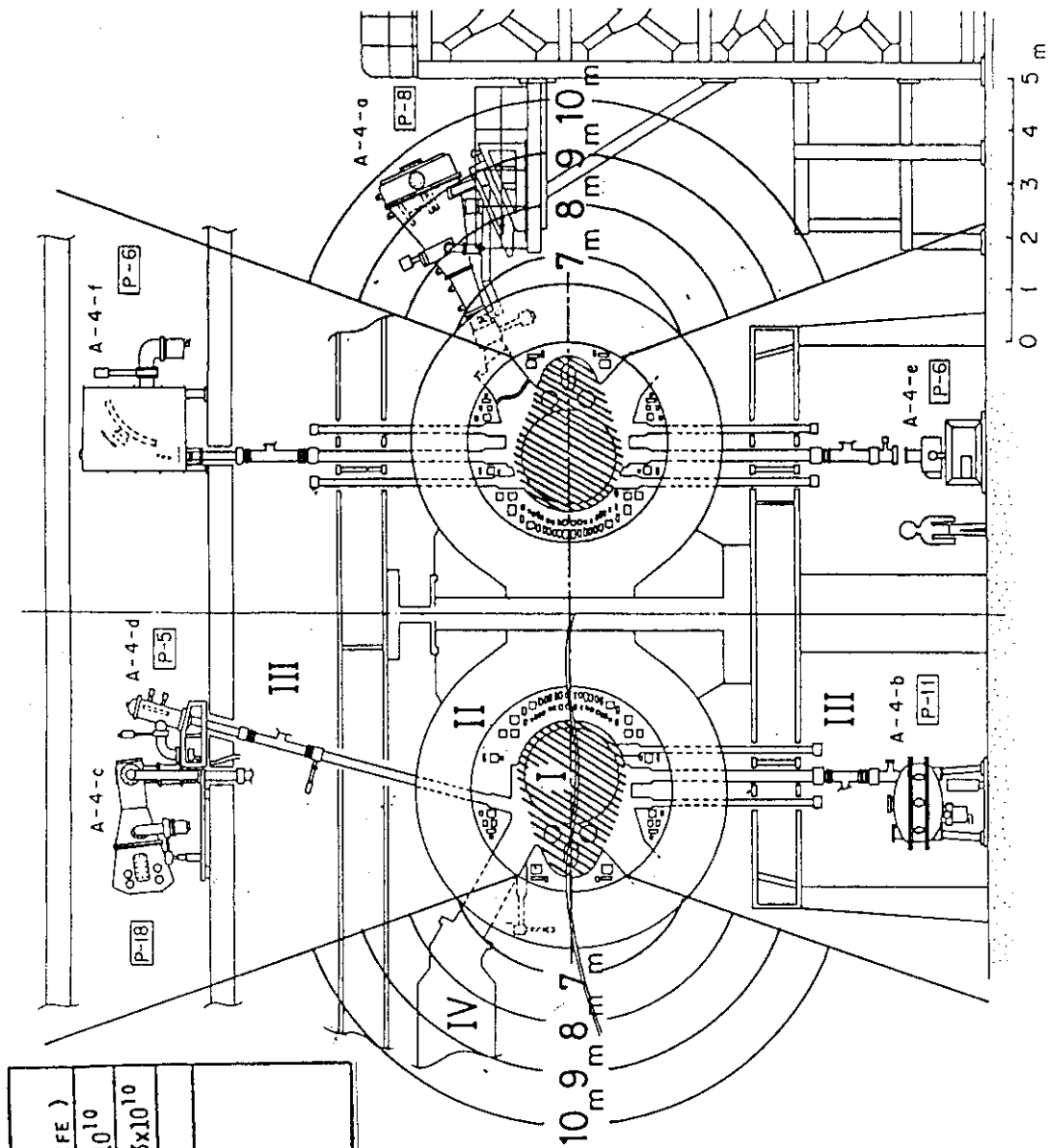


図 2.3 分光器ユニットを装着した例



REGION	X-RAY DOSE (R/LIFE)	NEUTRON (N/CM ² /LIFE)
I	$2 \times 10^8 - 5 \times 10^5$	$1 \times 10^{11} - 3 \times 10^{10}$
II	$5 \times 10^5 - 1 \times 10^3$	$3 \times 10^{10} - 1.3 \times 10^{10}$
III	1×10^3	1.3×10^{10}
IV	R-7M	8×10^9
	R-8M	6×10^9
	R-9M	4×10^9
	R-10M	3×10^9

図 2.5 JT-60 で予想される放射線環境と分光計測システムの配置図

3. JT-60分光計測用検出器の ^{60}Co γ 線照射試験

3.1 概要

JT-60計測装置内に使用されている電子部品類は放射線を被曝することにより様々な問題を生ずることが予想される。特に光電変換素子類は高線量の被曝を受けた場合には、著しい特性劣下を生じたり、破壊に至る可能性があるものと考えられる。そこで今回は高線量の放射線照射後および照射下における素子特性の変化、特に動作中における素子の挙動を確認することとした。

計測装置に使用される光電変換素子及び電子部品類を次の4種類に分け実験を行った。

1. 光電子増倍管
2. シリコンフォトダイオード
3. 回路系 (アナログ回路, デジタル回路)
4. ガラス面板

3.2 試験の概要

本実験は原子力研究所, 高崎研究所, ^{60}Co γ 線照射施設を用いて行った。実験の日程は次の通りである。

昭和57年11月30日～12月2日

^{60}Co γ 線照射場状況を図3.1, 図3.2に示す。図に示す様に測定用試料を照射室内に入れ, ^{60}Co γ 線源からの γ 線を照射する。この時, 各素子の動作状態及び変化を測定した。 γ 線の線量は線量率計によるモニタリングから求めた。現在JT-60用計測装置が設置される場所は下記の放射線に曝される事が予想されている。

X線全線量 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ R/Life}$

今仮にJT-60の全ショット数を 5×10^3 回とすると線量率は,

X線全線量	線量/1回	線量率/1回-10 sec
i) $1 \times 10^3 \text{ R}$	0.2 R	72 R/h
ii) 1×10^5	20 R	$7.2 \times 10^3 \text{ R/h}$

となる。これはX線がプラズマ放電時10秒間に平均的に放射されると仮定したものであり, これが短時間に放射される様になれば線量率はさらに大きな値となる。

本実験はこれ等の予想線量値に基づき照射量を定めて測定を行った。

3.3 測定と結果

3.3.1 光電子増倍管の測定と結果

(1) 照射資料

本実験に使用した光電子増倍管は 1 1/2 吋ヘッド オンタイプの R 1508, R 189 の 2 種類であり, 光電面材質はマルチアルカリとバイアルカリが使用されている。

	型番	光電面材質
サンプル 1	R 1508 (TA 0019)	マルチアルカリ
サンプル 2	R 1508 (TA 0037)	マルチアルカル
サンプル 3	R 189 (BA 0602)	バイアルカリ

(2) 試験方法

あらかじめ分光感度等の初期特性を測定したサンプルと暗箱中に入れ γ 線を照射し, γ 線照射中及び照射後の感度変化及び暗電流特性を測定した。 γ 線照射中の感度変化を測定できる様暗箱中にタングステンランプを置き簡単な感度特性の変化を確認した。タングステンランプのガラス部分が γ 線で変色し発光量変化を起さない様にランプ部分は鉛ブロックを使い遮蔽を行った。分光感度特性については照射場での測定ができなかったため, 後日測定を行った。照射場の線量率は図 3.3 に示す様に被測定物の横に置き, 同時モニタリングを行った。

(3) 実験結果

照射後の外観

各光電子増倍管共に目立った変化は見られないが, 6.5×10^4 R を照射したサンプル 3 (R 189) はダイノードを固定するタイト板が黄色に変色しているのが見られた。ガラスバルブ, ベース等の変化は見受けられない。

(2) 照射前後での特性変化

各サンプルの照射前特性と, 照射後の特性を表 3.1 ~ 表 3.3 に示す。暗電流は照射線量の増加と共に初期測定値に比べ大幅に増加している事がわかる。照射線量による暗電流の増加割合を図 3.4 に示す。光電面及びダイノードでの感度特性に変化は見られない。又光電面の分光感度特性にも特に目立った変化は認められない。

(3) γ 線による疑信号の発生

光電子増倍管に γ 線を照射すると照射線量に比例した疑信号が発生する。線量率と出力電流の関係を図 3.5 に示す。図から判る様に入射する線量率と信号出力はほぼ $r = 1$ の関係がある。

(4) γ 線による暗電流の変化

γ 線を光電子増倍管に照射すると照射後の暗電流が増加している事が確認されたが, 一時的に増加した暗電流は, γ 線の照射を中止すると図 3.6, 図 3.7 に示す様に時間と共に減少する。

(5) γ 線照射中における光電子増倍管の動き

γ 線照射中における光電子増倍管の信号出力特性を図 3.8, 図 3.9 に示す。各々 10^2 R/h と 10^3 R/H を照射した時と照射しない時との信号出力電流の変化が示されている。図から判る様に γ 線が照射された場合, 疑信号のため, 信号のダイナミックレンジはほとんど取れないことが判る。

3.3.2 シリコンフォトダイオードの測定と結果

(1) 照射資料

照射試料は比抵抗に範囲をもたせる為に次の3種類を選び測定した。

- i) S 1336 - 8 BQ 比抵抗 1 K Ω - cm
- ii) S 874 - 5 K " 数 Ω - cm
- iii) S 1226 - 8 BQ " 0.015 Ω - cm

(2) 試験方法

i) オンライン試験

試料は各3本ずつアルミ材の暗箱内に固定し、出力は電流-電圧変換器により、短絡電流 (I_{sh}) を検出した。線量率は、Co-60線源からの距離と線源の強度により設定し、シリコン太陽電池線量率計 (SIC) によりモニタリングした。

線量率は、 $9 \times 10^1 \sim 9.2 \times 10^4$ R/Hまでの範囲であった。また γ 線照射中のランプによる光電流も検出された。電流-電圧変換器、ランプは γ 線による損傷を防ぐため鉛ブロックにて遮蔽した。

測定系の概要を図3.10に示す。

ii) オフライン試験

他に5本はオフラインの照射損傷実験サンプルとした。線量は 5×10^3 , 10^4 , 5×10^4 , 1.5×10^5 , 4.5×10^5 Rであった。余りの2本は最終測定時のレファレンスとした。

(3) 初期・最終測定項目 (温度: 25 °C)

1) I_{sh} : 100 lx, 2856 Kのランプによる短絡電流

2) V_{op} : 100 lx, 2856 Kのランプによる開放電圧

3) 絶対分光感度

λ_s, λ_l : 短波長側, 長波長側 5%感度波長

λ_p : ピーク波長

R 200, R_p : 200 nm, ピーク波長での感度

4) $I_{d_{EV}}$: 逆方向電圧: EVでの暗電流

5) I_{st} : 飽和電流, $R_L = 1$ K Ω

6) t_r : 立上り速度, $R_L = 1$ K Ω , $\lambda = 655$ nmでのステップ関数光応答

7) $C_{j_{EV}}$: $V_R = EV$ での接合容量

(4) 実験結果

i) オンライン試験

図3.11は γ 線による出力電流-線量率を示したものの $10^2 \sim 10^5$ R/hの範囲でリニアになっている。

また出力電流は比抵抗の大小関係と同じになっている。これは、高抵抗ウェハではトラップ密度が小さく(拡散長が長い)ためである。なお今回の実験の線量率($9 \times 10^1 \sim 9.2 \times 10^4$ R/h)では γ 線照射中の光電流は十分安定だった。

ii) オフライン試験

表3-5は照射前後の特性の比較

3種類とも 10^5 R のオーダーで暗電流が増加し、S 1226 - 8BQ のCj, S 874 - 5K, S 1226 - 8BQ の感度に変化が起きている。サンプルが少ないため明確な判断とはなりえないまでも、Co - 60 による γ 線では 10^4 R 程度がこれらのSPDのライフと推定される。

3.3.3 回路系の測定と結果

(1) 照射資料

電子部品類の γ 線に対する特性等は参考文献が多く大略の予想をすることが可能である。今回は電子回路の動作中における挙動を確認する目的で試験回路を製作し、異常動作発生の有無を確認した。通常電子回路はアナログ回路とデジタル回路の混在したもので構成されている。このため回路系の γ 線照射試験を行うに当りアナログ回路とデジタル回路に分け、特にその回路を構成する代表的な素子を各々選び測定を試料とした。

(2) 試験方法

試験はPC板に図3.12～図3.14の回路を組み、 γ 線を照射した時の状態を観察する方法を取った。アナログ回路では、 γ 線照射の有無により各素子の異常動作と破壊の状況を電圧値を讀取ることを確認した。デジタル回路では、 2^{24} カウンタを動作させ、この時のカウントミスの発生を確認する方法を取った。外来ノイズによる誤動作を検出しない様に、2つのカウンタを同時に動かさず、片方は γ 線を照射しないでこの間の差をカウントミスとして検出した。

(3) 実験結果

各線量と測定の結果を表3.6に示す。アナログ回路では大略 10^5 R/h 程度の線量率でも基本的な動作には問題は生じないと考えられる。但しS/N等の問題は測定が困難であることから確認は行っていない。

デジタル回路では 10^4 R/h 程度までは誤動作等のカウントミスは確認されなかった。 10^5 R/h の線量率の時、カウンターの一部分が破壊をし、限界の線量である事が判る。

3.3.4 ガラス面板の測定と結果

(1) 照射試料

光電変換素子類に広く使用されている光学材料のガラス面板、3種類を選び測定を行った。各サンプルは、25φ、1t 5枚を使用した。

- a 石英ガラス (SiO₂)
- b UVガラス (SiO₂ + B₂O₃ + Al₂O₃)
- c 硼硅酸ガラス (SiO₂ + B₂O₃ + BaO)

(2) 試験方法

γ 線照射場中に3種類の面板を置き、各々所定の γ 線を照射し、透過率の変化等の諸特性変化を測定した。5枚のサンプル中4枚には段階的な線量を照射し、1枚は比較用としてその差を測定した。照射した線量は 1×10^3 R ~ 5×10^4 R であり、特性の変化は分光器を使用して透過率の変化を各波長について測定した。

(3) 測定結果

各特性を図3.15～図3.17に示す。3種類の各サンプル共にサンプル間での透過率のバラツ

が多く、線量による特性変化を明確につかむことができなかったが、UV ガラスに於いては、300 nm 以下では 5×10^4 R 程度で、硼硅酸ガラスでは 300 nm 以上で $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ R では透過率が低下している。石英ガラスではほとんど変化を見出すことはできなかった。

3.4 考 察

今回の試験では光電子増倍管の高線量下での使用では、大体、 10^4 R/h 程度の線量率では分光感度その他への影響はないものと考えられる。線量が 10^4 R 以上となった場合、外観異常、暗電流の増加等が認められるので限界線量と考える。ガラスの透過率は γ 線照射後時間と共に回復する事が確認されているので、今回の分光感度等への影響も測定が照射数日後であった事から断定する事はむずかしい。

図 3.6～図 3.7 に示される様な暗電流の一時的増加は計測に大きな問題を生ずる事が予想される。特に照射間隔が 5～10 分以下では暗電流は安定せず、大きな計測での誤差を生ずるものと考えられる。暗電流を安定させるまでには相当長時間の測定間隔を取る必要がある。暗電流の一時的な増加は光パルスでも観測される事から同一の原因であろうと考えられるが、はっきりとした事は判っていない。

γ 線照射中の光電子増倍管は、 γ 線に感度を有するため検出対照光以外の疑信号を発生する。大略、 100 R/h の線量率で数百 nA ～ 1μ A 程度の信号電流となる。

^{60}Co の γ 線照射下では、コンプトン散乱による電子放出が支配的である。この電子放出が光電子増倍管のどの部分で発生しているかについて別の試験の結果、ダイノード部分からの放出ではなく光電面部であろうことがほぼ推測された。担し、光電面物質自身からの二次電子放出であるか、ガラス面の発光による光電子放出であるかは確認されていない。

今、仮にカソード面からの全電子で、疑信号 1μ A が発生するものとすればカソード電流 I_K は

$$I_K = I_P / G \quad \begin{array}{l} I_P \dots\dots\dots \text{アノード電流} \quad 1 \times 10^{-6} \text{ A} \\ G \dots\dots\dots \text{増倍率} \quad = 10^4 \text{ at } 800 \text{ V} \end{array}$$

$$= 10^{-10} \text{ A となる。}$$

R 189, R 1805 共に有効光電面は $34 \text{ mm } \phi$ であるので単位面積当りの入射光子数 P に換算すると、

$$P = I_K / S \eta e \quad \begin{array}{l} S \dots\dots\dots \text{有効面積} \quad 34 \text{ mm } \phi \\ \eta \dots\dots\dots \text{量子効率} \quad \text{約 } 24 \% \\ e \dots\dots\dots \text{電子の電荷} \quad 1.6 \times 10^{-19} \text{ C (最大感度波長)} \end{array}$$

$$= 3.4 \times 10^8 \text{ photon/cm}^2$$

となる。照射線量率にすると約 7.5×10^2 R/h となり、実験値とほぼ一致する。JT-60 では最大 7.2×10^3 R/h の照射線量率が想定されているのでこの場合、S/N 上の問題が起こる。

シリコンフォトダイオードの γ 線による出力電 I_r は次式より表わされる。

$$I_r = \frac{e \mu_{en}(\text{Si}) \rho L A E \phi}{e}$$

e : 電子の電荷 1.6×10^{-19} C

ρ : シリコンの密度 2.3 g/cm^3

$\mu_{\text{en}}(\text{Si})$: シリコンの質量エネルギー吸収係数 $1.25 \text{ MeV } \gamma$ 線に対し $0.0265(\text{cm}^2/\text{g})$

ϵ : 電子-正孔対を1つ生成するのに必要なエネルギー 3.67 eV

E : γ 線のエネルギー, 1.17 MeV と 1.33 MeV を平均して 1.25 MeV とする。

ϕ : 光子束密度 ($\text{ケ/cm}^2 \cdot \text{sec}$)

A : 有効受光面積 10^{-2} cm^2 に正規化

L : 拡散長 $1 \text{ K } \Omega \text{ cm}$ 比抵抗ウェハでは

拡散定数 : $D_n = 80 \text{ cm}^2/\text{sec}$

ライフタイム : $\tau = 2 \times 10^{-4} \text{ sec}$ とすると

$$L = \sqrt{D_n \tau} = 0.126 \text{ cm}$$

ここで照射線量率を D (R/h) とすると

$$\begin{aligned} \mu_{\text{en}}(\text{Si}) E \phi &= 87.0 \times \frac{\mu_{\text{en}}(\text{Si})}{\mu_{\text{en}}(\text{air})} \cdot \frac{D}{3600} \quad (\text{evg}) \\ &= \frac{87.0}{1.6 \times 10^{-2}} \cdot \frac{0.0265}{0.0268} \cdot \frac{D}{3600} \quad (\text{eV}) \\ &= 1.5 \times 10^{10} D \quad (\text{eV}) \end{aligned}$$

したがって

$$I_r = 1.90 \times 10^{-12} D \quad (\text{A})$$

となる。これより 10^3 R/h の線量率で, 1 mm^2 の接合で得られる電流は 1.9 nA になる。実験では図 3 から 1.6 nA/mm^2 となっている。これは計算に格子欠陥などによる拡散長の低下を考慮していないことになると思われる。

アナログ回路では 10^5 R/h 程度の線量率でも問題は生じなく, 動作はしたが個々の部品類の γ 線に対する耐性はもう少し低い所に有ると思われる。¹⁾

今回のテストでは, 部品数が少なく, 回路系を構成する場合の信頼性を調べるには多量のサンプルを用いた集中的テストを行う必要があるものと考えられる。ロジック系の結果からも, 線量率でも 10^4 R/h 以下の値におさえる事が必要であろうと考えられる。

ガラス面板の透過率の測定ではサンプル間のバラツキが大きい事と照射終了後の時間的な経過が問題で, はっきりは断定できない面が多い。しかし, 光学的な面からも発光中心をもたない石英ガラスの使用が望ましい。

表 3.1 照射による PMT の特性変化(1)

		照射前	照射中	照射後
TEST 1.2	Id	12 (PA)	0.4 (μ A)	0.75 (nA)
線量率 95 R/hr (7分)				
SAMPLE # 1 (TA 0019)	Is	1.38 (μ A)	1.75 (μ A)	1.35 (μ A)
HV = - 800 V	(6V) LAMP			
TEST 3	Id	521 (PA)	43 (μ A)	2.0 (nA)
線量率 10^3 R/hr (10分)	(LAMP)			
SAMPLE # 1 (TA 0019)	Is 1	0.82 (nA)	4.32 (μ A)	3.0 (nA)
	2	28 "	4.36 "	25 "
	3	111 "	4.45 "	115 "
	4	320 "	4.68 "	315 "
	5	700 "	5.08 "	710 "
	6	1280 "	5.60 "	1300 "
TEST 4	Id	0.32 (nA)	82 (nA)	0.4 (nA)
線量率 9 R/hr (10分)				
SAMPLE # 37 (TA 0037)	Is 1	1.84 (nA)	83 (nA)	1.58 (nA)
	2	34.5 "	118 "	37 "
	3	187 "	207 "	187 "
	4	565 "	620 "	560 "
	5	1250 "	1300 "	1280 "
	6	2320 "	2370 "	2400 "
HV = - 800 V				

Id: 暗電流, Is: 信号電流, HV: 供給電圧

表 3.2 照射による PMT の特性変化 (2)

		照射前	照射中	照射後
TEST 5	Id	0.4 (nA)	4.7 (nA)	0.32 (nA)
線量率 1 R/hr (10分)	Is (1)		5.8 (nA)	1.35 (nA)
SAMPLE # 37 (TA 0037)	(2)		38 "	35 "
HV = 800 V	(3)	-	144 "	186 "
	(4)		550 "	530 "
	(5)		1260 "	1200 "
	(6)		2100 "	2300 "
TEST 6	Id	0.27 (nA)	1 (μA)	2.5 (nA)
線量率 100 R/hr (10分)	Is (1)		1.0 (μA)	3.65 (nA)
SAMPLE # 37 (TA 0037)	(2)	-	1.04 "	36 "
HV = 800 V	(3)		1.16 "	140 "
	(4)		1.5 "	540 "
	(5)		2.2 "	1220 "
	(6)		3.2 "	2200 "

	線量率	時間	Id	LAMP Is (2V)	
TEST 7	1×10^3	10分	4.5 (μA)	4.5 (μA)	} SAMPL (BAO 602) HV = 800 V
TEST 8	3×10^3	10分	17.5 "	17.5 "	
TEST 9	6.7×10^3	10分	65.0 "	65 "	
TEST 10	8.8×10^4	10分	84.0 "	84 "	

TEST 7 ~ TEST 8 の前後での変化

	Id	Is (2V)
テスト前	0.215 (nA)	36 (nA)
テスト後	0.22 (μA)	0.255 (μA)

表 3.3 照射による SPD の特性変化 (S 1336 - 53 Q)

項目	単位	No	1	7	8	2	3	9	5	4	条件
Ish	NA		4.86	4.91	4.89	4.86	4.87	4.87	4.91	4.87	100ℓX, 2856 K
Vop	mV		303	302	303	300	300	299	300	301	
λs	nm		200			200	200	200		200	5% 感度波長 ピーク感度
λl			1160			1160	1160	1160		1160	
λp			940			940	940	920		940	
R 200	mA/W		97			98	101	102		104	λ - 200 nm ピーク波長
Rp			533			523	524	518		518	
Id 10mV	PA		17	16	18	17	19	24	21	18	UR = 10 V
Id 5 V			113	763	110	141	225	189	169	115	VR = 5 V
Id 15V			234		209	286	501	349	323	224	VR = 15 V
Ist	mA		. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	RL = 1 K Ω
tr	μs		2.0	1.4	1.6	1.6	1.4	2.4	1.2	2.0	RL = 1 K Ω
Cj 0 V	PF		56	57	57	59	56	56	55	58	VR = 0V f = 10 KHZ R = 5V
Cj 5 V			14	14	14	15	14	14	14	14	

最終測定データ

項目	単位	No	1	7	8	2	3	9	5	4	線源 ; ⁶⁰ Co
		線量	1.9×10 ²	5×10 ³	10 ⁴	1.5×10 ⁴	4.5×10 ⁴	5×10 ⁴	1.5×10 ⁵	4.5×10 ⁵ (R)	
		線量率	90~9000	5×10 ³	10 ⁴	9×10 ⁴	9×10 ⁴	5×10 ⁴	9×10 ⁵	9×10 ⁵ (R/hr)	
		時間	各 10	60	60	10	30	60	10	30 (min)	
Ish	μA		4.85	4.91	4.87	4.85	4.86	4.84	4.86	4.86	同上
Vop	mA		309	309	310	310	309	305	307	301	
λs	nm		200	/	/	200	200	/	200	200	
λl			1160	/	/	1160	1160	/	1160	1160	
λp			940	/	/	941	940	/	940	940	
R 200	mA/W		88	/	/	91	95	/	97	95	
Rp			524	/	/	523	527	/	521	515	
Id 10V	PA		13	12	14	13	14	18	15	18	
Id 5 V			62	56	60	63	90	125	80	98	
Id 15V			217		191	271	520	490	333	540	
Ist	mA		. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	. 21	
tr	μs		1.8	2.6	2.0	2.5	1.5	2.0	2.0	3.5	
Cj 0 V	P F		58	59	59	61	59	58	58	60	
Cj 5 V			16	16	16	17	16	15	16	16	

最終測定的项目中, Ish, Vop, Id 絶対分光感度は照射後 1 週間以内, 他の項目は 2 週間以内に測定された。表 3.2, 3.3 についても同様。

表 3.4 照射によるSPDの特性変化 (S 874 - 5 K)
初期測定データ

項目	単位	No. 2	7	8	3	4	9	1	5	条件
Ish	μA	4.40	4.51	4.11	4.32	4.43	4.47	4.58	4.45	100 ℓX, 2856 K
Vop	mV	395	394	381	386	394	395	400	397	
λs	nm	360	/	/	360	360	/	360	360	5%感度波長 ピーク感度
λl		1160	/	/	1160	1160	/	1160	1160	
λp		840	/	/	840	860	/	860	860	
Rp	mA/W	530	/	/	521	523	/	549	530	ピーク感度
Id 10mV	PA	0.5	0.4	0.6	0.6	1.4	0.4	0.4	0.5	VR = 10 mV
Id 15 V		50	45	51	42	119	42	40	44	VR = 15 V
Id 30V		99	94	105	85	192	102	82	99	VR = 30 V
Ist	mA	.32	.32	.32	.31	.31	.33	.32	.32	RL = 1 KΩ
tr	μs	2.5	2.4	2.0	2.0	2.2	2.4	2.5	2.3	RL = 1 KΩ
Cj 0V	PF	700	624	606	599	601	639	700	700	VR = 0 f = 10 KHZ
Cj 5V		239	217	204	200	202	215	239	239	VL = 5 V

最終測定データ

項目	単位	No.									線源
		時間	各10	60	60	10	30	60	10	30 (min)	
		線量 1.9×10 ³ 5×10 ³ 10 ⁴ 1.5×10 ⁴ 4.5×10 ⁴ 5×10 ⁴ 1.5×10 ⁵ 4.5×10 ⁵ (R)									線源 線量率 90~90005×10 ³ 10 ⁴ 9×10 ⁴ 9×10 ⁴ 5×10 ⁴ 9×10 ⁵ 9×10 ⁵ (R/hr): ⁶⁰ Co
Ish	μA	4.36	4.47	3.92	4.27	4.37	4.30	4.21	3.75	同上	
Vop	mV	4.06	405	405	395	400	401	405	393		
λs	nm	360	/	/	360	360	/	360	360		
λl		1160	/	/	1160	1160	/	1160	1160		
λp		860	/	/	840	840	/	840	840		
Rp	mA/W	528	/	/	517	518	/	544	513		
Id 10mV	PA	0.3	0.3	0.6	0.4	1.2	0.6	1.1	2.1		
Id 15		41	42	85	54	125	107	220	420		
Id 30		99	86	150	104	260	211	430	820		
Ist	mA	.34	.34	.34	.35	.34	.35	.36	.34		
tr	μs	2.3	2.1	2.0	2.0	2.1	2.0	2.1	2.0		
Cj 0V	PF	667	637	602	595	598	632	698	696		
Cj 5V		231	218	206	203	204	217	240	240		


表 3.5 照射によるSPDの特性変化 (S 1226 - 8 BQ)
初期測定データ

項目	単位	No	1	7	8	2	3	9	5	4	条件
Ish	μA		14.0	14.4	14.1	14.5	14.0	14.0	13.9	14.7	100 ℓX, 2856 K
Vop	mV		357	367	359	354	361	363	355	347	
λs	nm		200			200	200		200	200	5%感度波長
λl			1060			1060	1060		1060	1060	ピーク感度
λp			740			740	740		740	740	
R 200	mA/W		95			92	94		93	94	λ = 200 nm
Rp			376			388	370		378	382	ピーク波長
Id 10mV	PA		60	7.0	10	12	6.1	7.3	11	57	VR = 10 mV
Id 5V	nA		85	60	26	37	42	71	17	16.5	VR = 5 V
Ist	mA		.27	.29	.28	.27	.28	.28	.27	.27	RL = 1 KΩ
tr	μs		3.6	3.2	3.2	3.0	2.6	2.7	3.0	2.3	RL = 1 KΩ
CjoV	PF		1330	1160	1250	1100	877	1120	1160	847	VR = 0V f = 10 KHZ
Cj 5V			462	439	440	411	417	415	431	439	VR = 5V

最終測定データ

項目	単位	No									条件
		1	7	8	2	3	9	5	4		
		線量 1.9×10 ³ 5×10 ³ 10 ⁴ 15×10 ⁴ 45×10 ⁴ 5×10 ⁴ 15×10 ⁵ 45×10 ⁵ (R)									線源 : ⁶⁰ Co
		線量率 90~90005×10 ³ 10 ⁴ 9×10 ⁴ 9×10 ⁴ 5×10 ⁴ 9×10 ⁵ 9×10 ⁵ (R/hr)									
		時間	各 10	60	60	10	30	60	10	30	
Ish	μA		14.0	14.4	14.0	14.5	13.8	13.9	13.5	13.7	同上
Vop	mV		368	377	369	364	372	371	307	350	
λs	nm		200			200	200		200	200	
λl			1060			1060	1060		1060	1060	
λp			740			740	740		740	740	
R 200	mA/W		90			85	90		95	87	
Rp			369			376	370		367	377	
Id 10mV	PA		56	5.1	7.5	14	5.7	6.6	194 nA	41	
Id 5V	nA		74	58	25	379	40	71	B. D.	151	
Ist	mA		.29	.29	.29	.29	.29	.29	.27	.28	
tr	μs		3.6	3.2	3.2	3.1	2.4	3.1	3.0	2.1	
CjoV	PF		1320	1140	1240	1090	867	1110	3400	840	
Cj 5V			436	440	440	412	422	418	B. D.	443	

表 3.6 回路系測定データ

EXPO Rate	Time	V_{ZD} (V)	V_{Tr} (V)	V_{FET} (V)	V_{HMP} (V)	Logic Cir	
(1) TEST 前	—	8.47	8.96	9.60	8.47	異常ナシ	
(2) 1×10^2 R/hr	10 (min)	8.48	8.97	9.60	8.47		
(3) 3×10^2 "	10 "	8.47	8.97	9.60	8.47		
(4) 1.1×10^3 "	10 "	8.47	8.96	9.60	8.47		
(5) 1.1×10^4 "	10 "	8.47	8.96	9.60	8.47		
(6) TEST 後	—	8.48	8.97	9.61	8.48		
(7) TEST 前	—	8.55	9.03	9.66	8.54		
(8) 1.05×10^5	10 "	8.56	9.04	9.68	8.55		
(9) TEST 後	—	8.56	9.04	9.68	8.56		
(10) TEST 前	—	8.52	9.01	9.65	8.52		
(11) 1×10^5 "	15 "	8.52	9.01	9.65	8.52		カウンタ破壊
(12) 1×10^5 "	15 "	8.52	9.01	9.65	8.53		"
(13) TEST 後	—	8.54	9.03	9.67	8.54		"

V_{TZ} ツェナー電圧
 V_{Tr} トランジスタ OUT
 V_{FET} FET "
 V_{AMP} OP AMP "

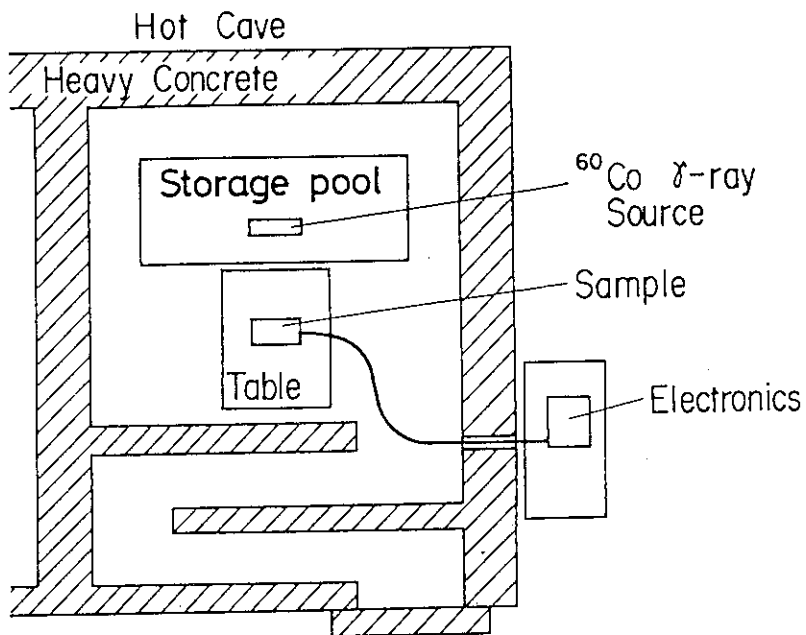


図 3.1 ^{60}Co 照射場の概要 (平面図)

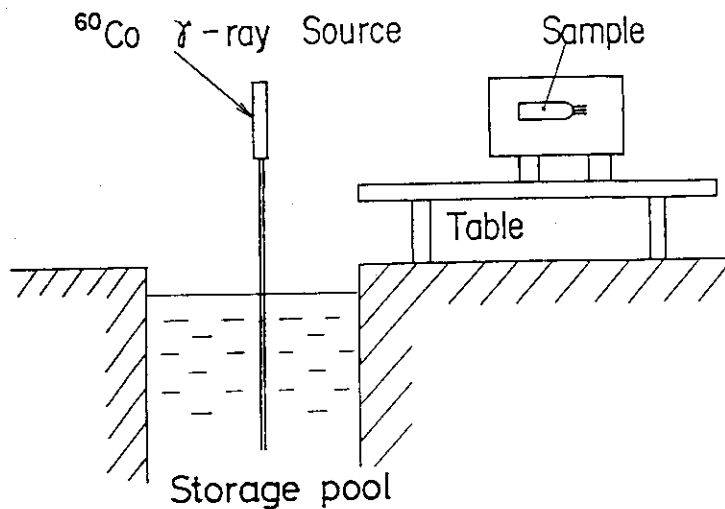


図 3.2 ^{60}Co 照射場の概要 (断面図)

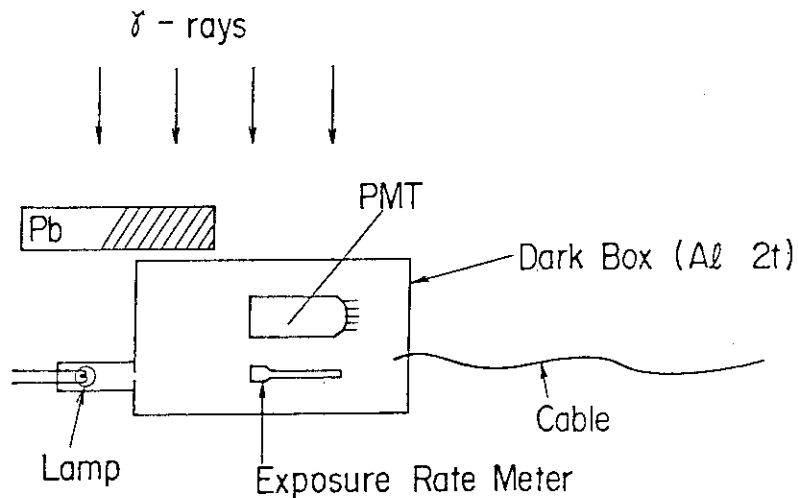


図 3.3 PMT の照射方法

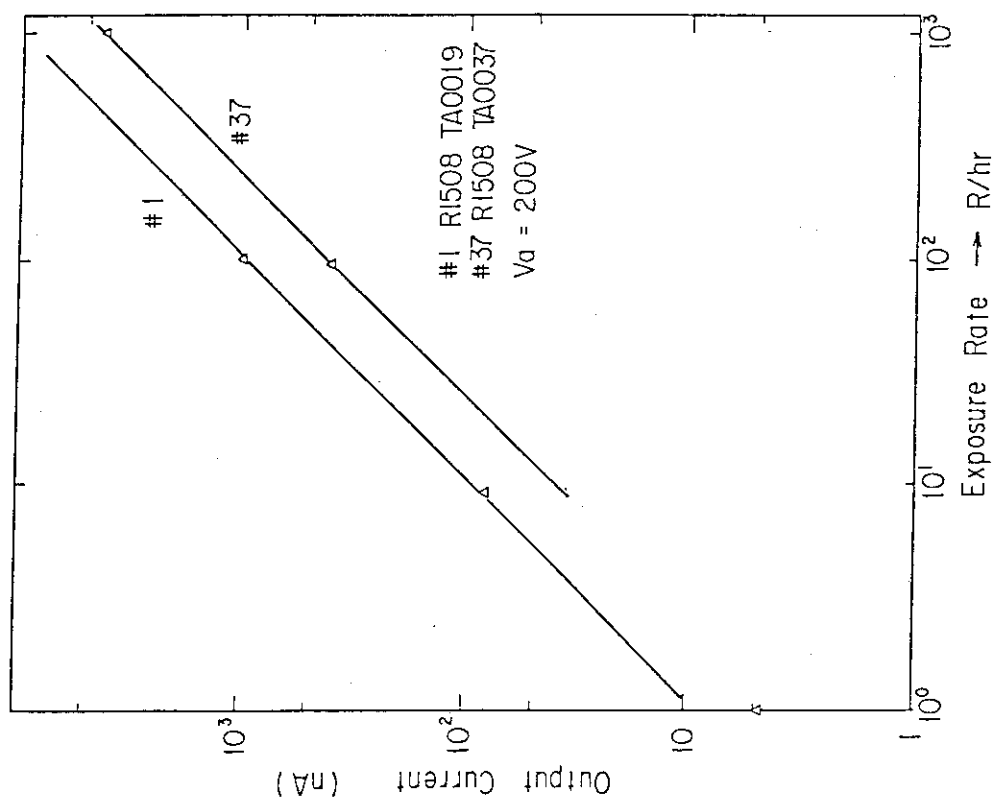


図 3.5 γ 線による PMT の出力

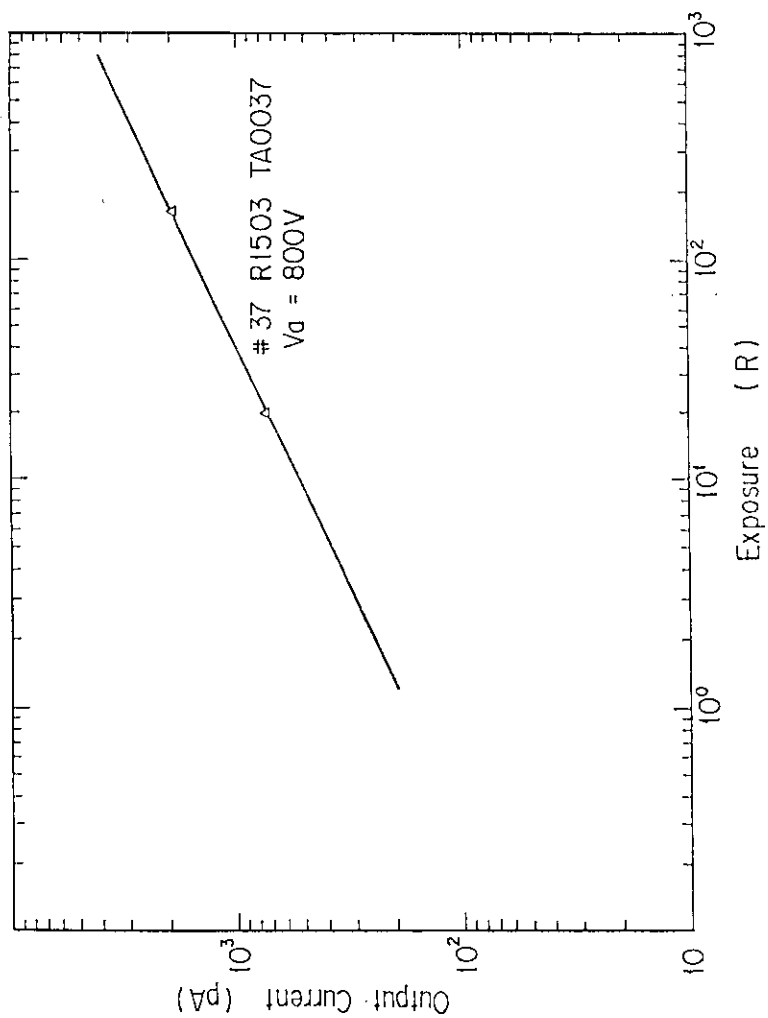


図 3.4 照射による PMT の暗電流変化

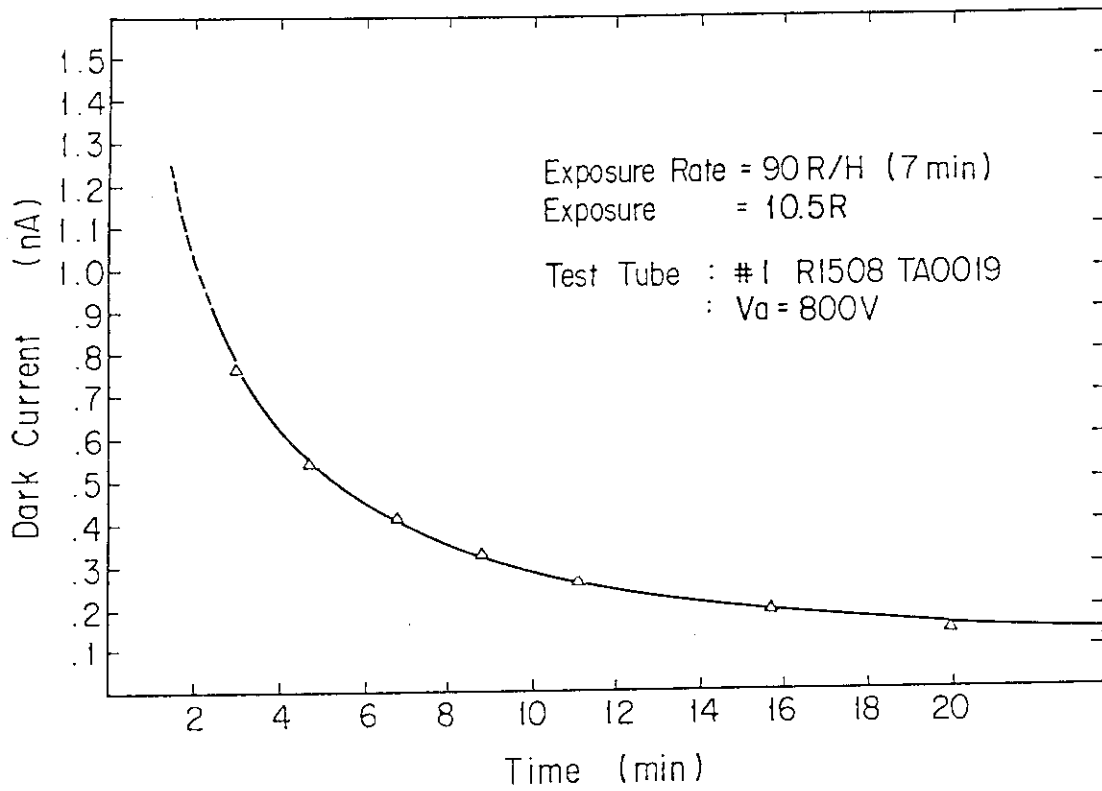


図 3.6 照射後の PMT の暗電流変化(1)

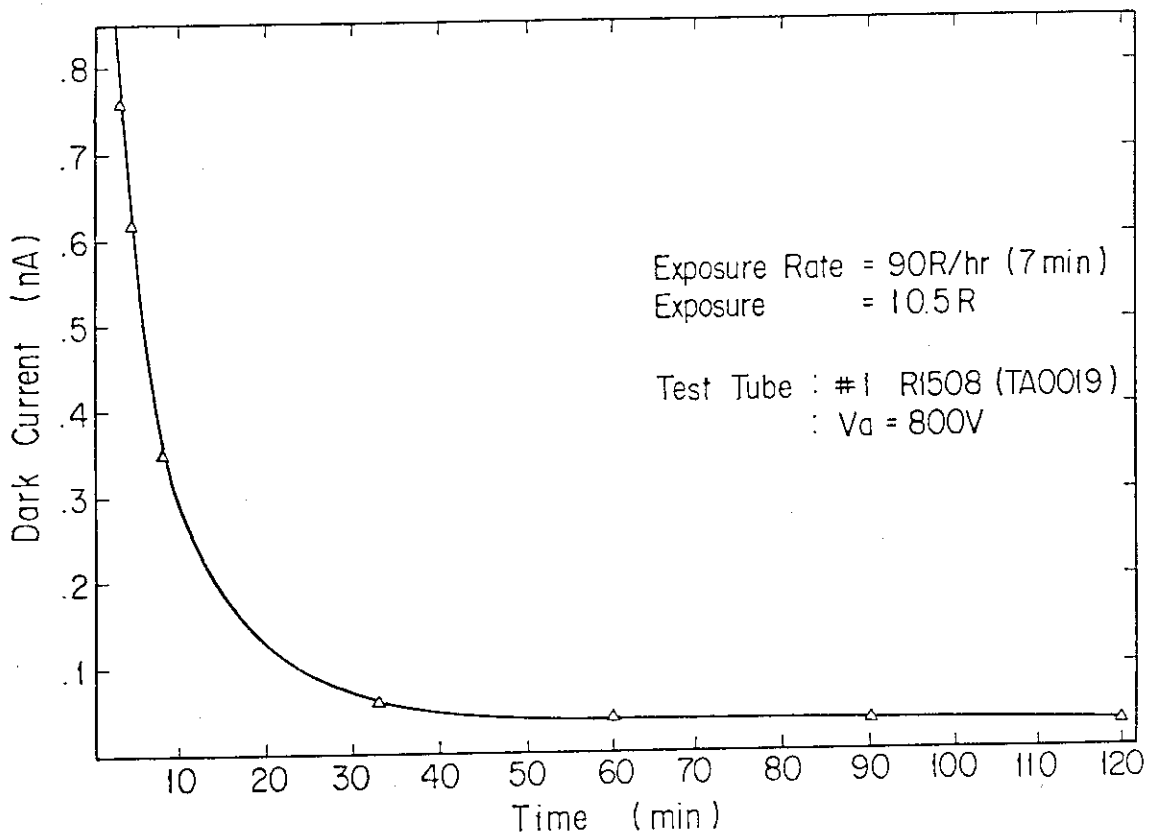


図 3.7 照射後の PMT の暗電流変化(2)

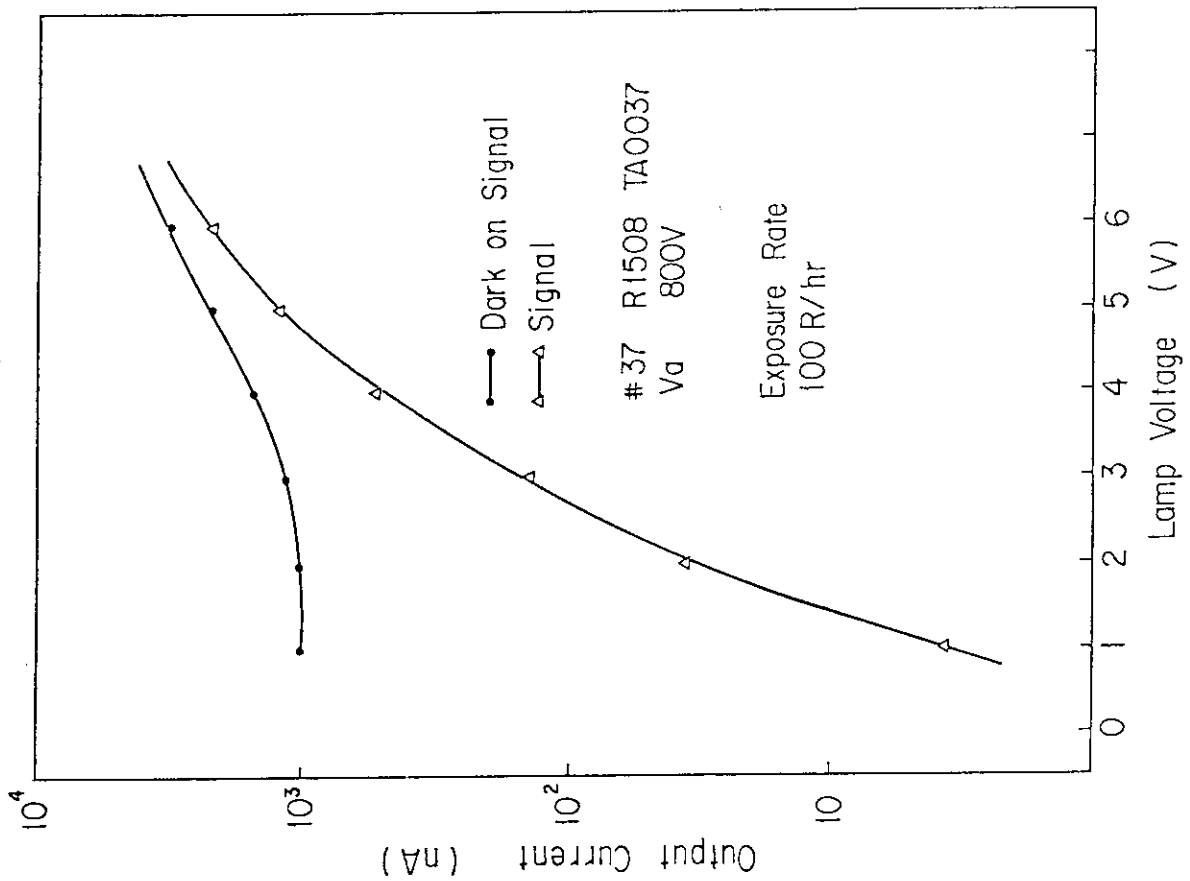


図 3.8 照射中の PMT の出力信号 (照射線量率 100 R/hr)

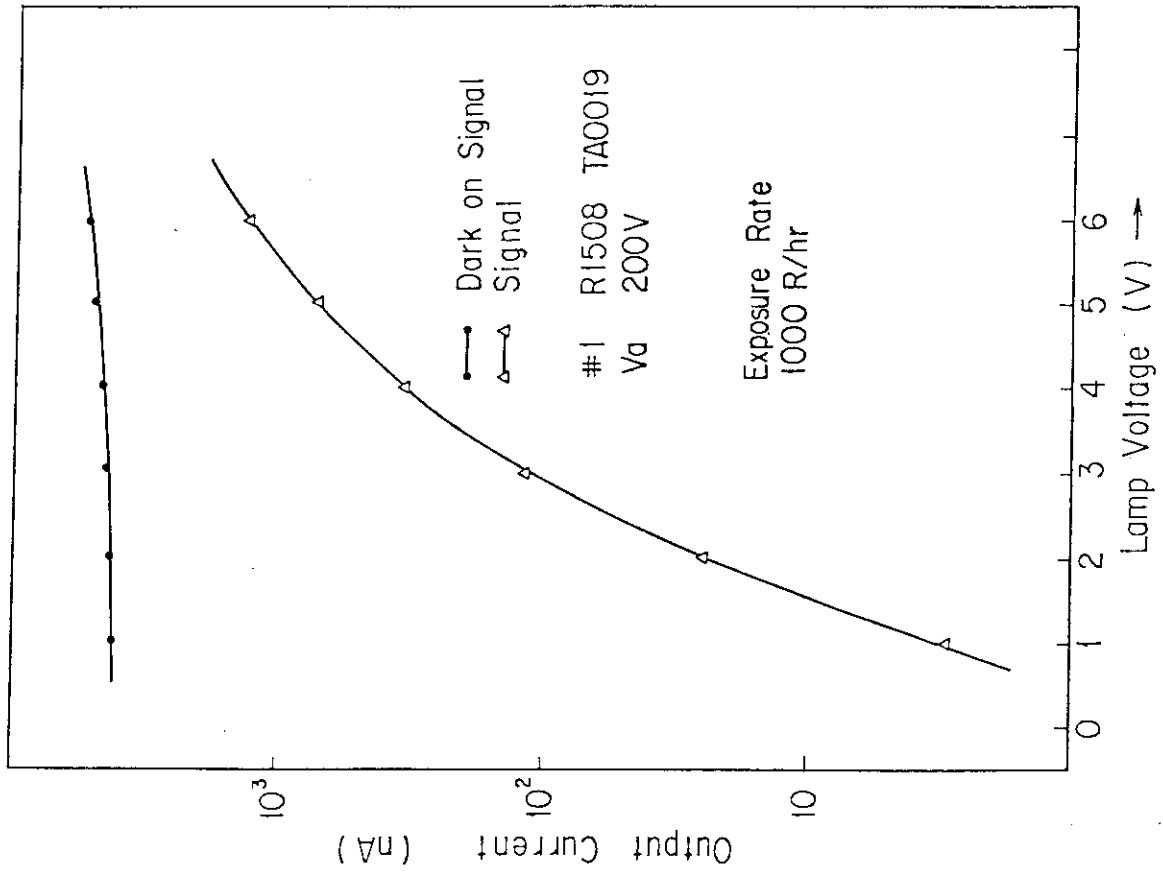


図 3.9 照射中の PMT の出力信号 (照射線量率 1000 R/hr)

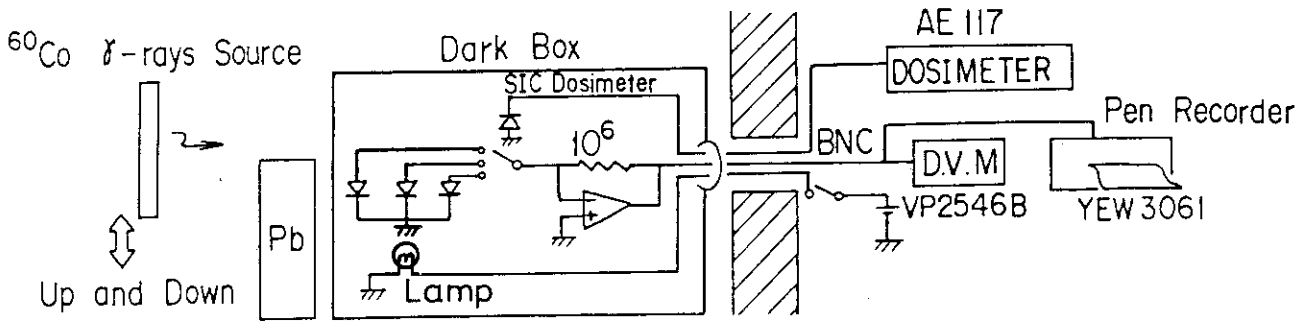


図 3.10 シリコンフォトダイオード照射試験の測定系

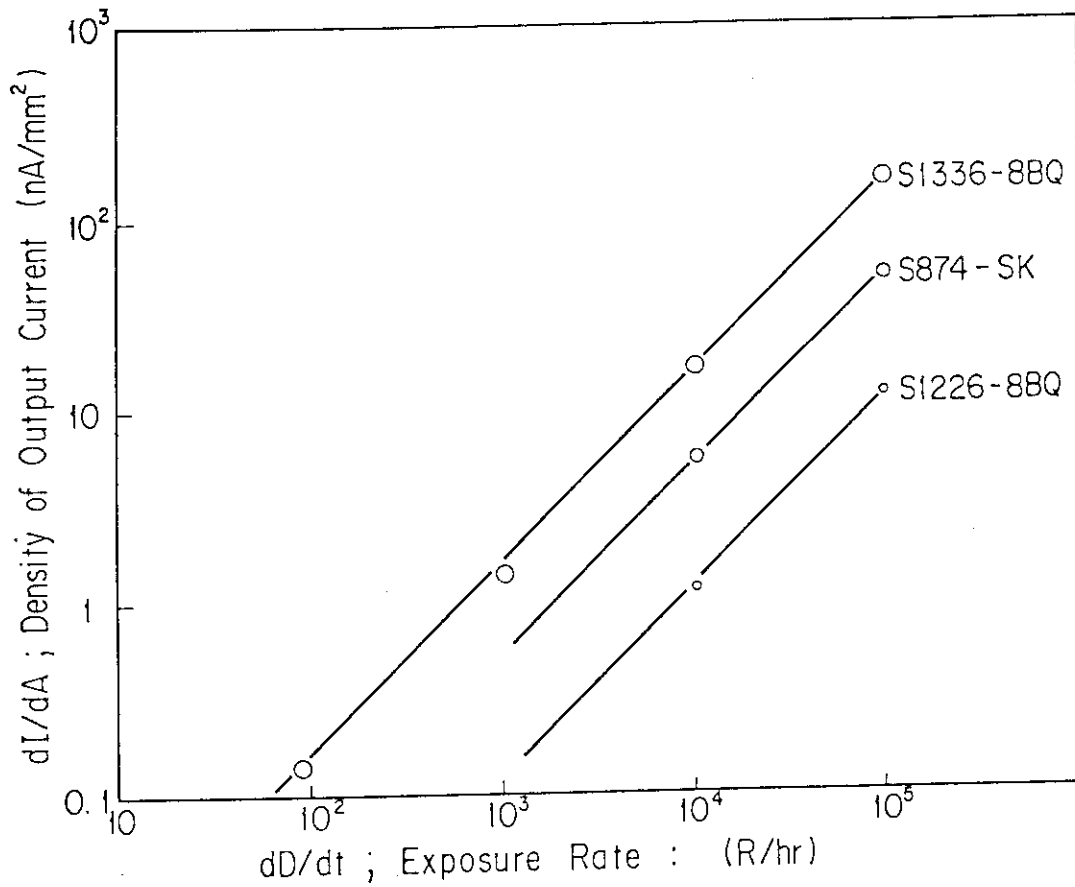


図 3.11 照射線量率とシリコンフォトダイオードの電流密度の関係

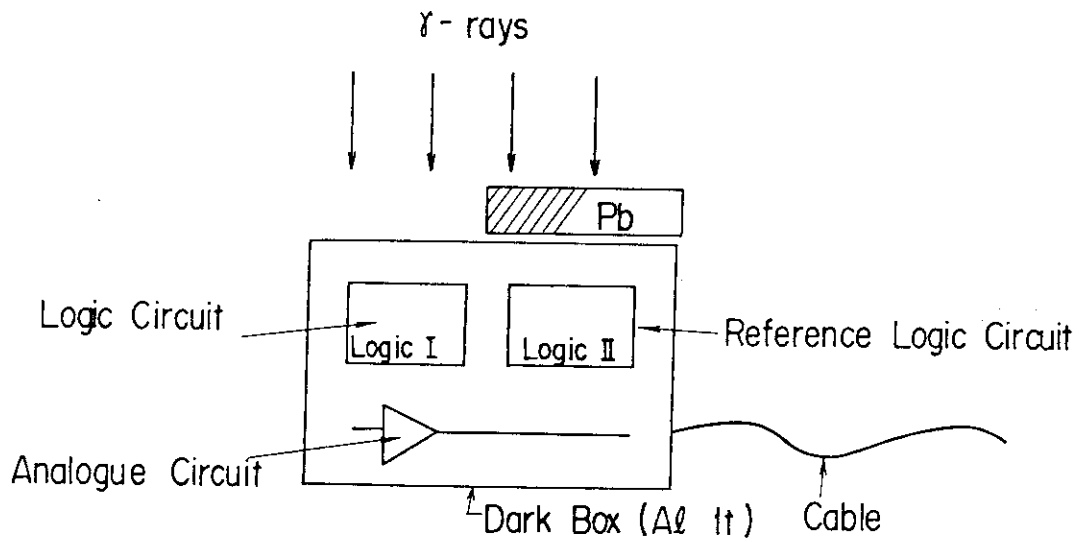


図 3.12 照射線量率とシリコンフォトダイオードの電流密度の関係

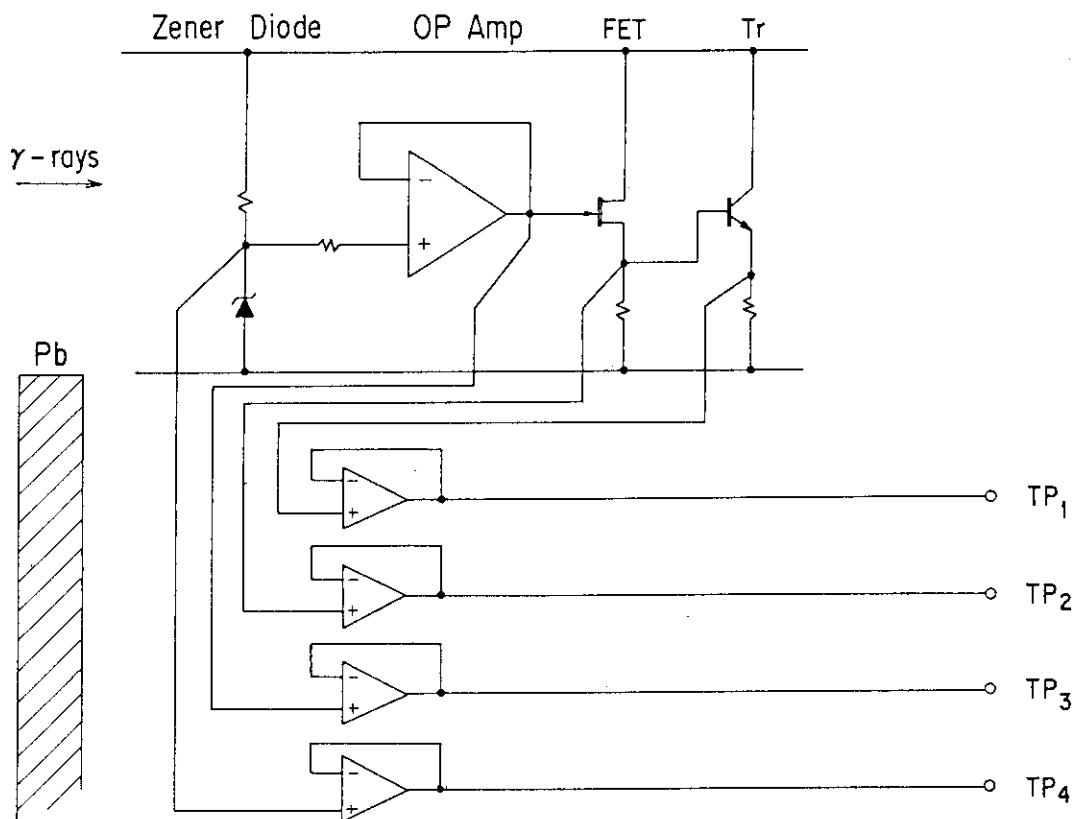


図 3.13 アナログ回路の構成 シェナーダイオード：トムソン社 IN 3156 A, OPアンプ：ハリス社 H 2525, FET：シリコクス 2 N 4392, トランジスタ：東芝 2 SC 1815

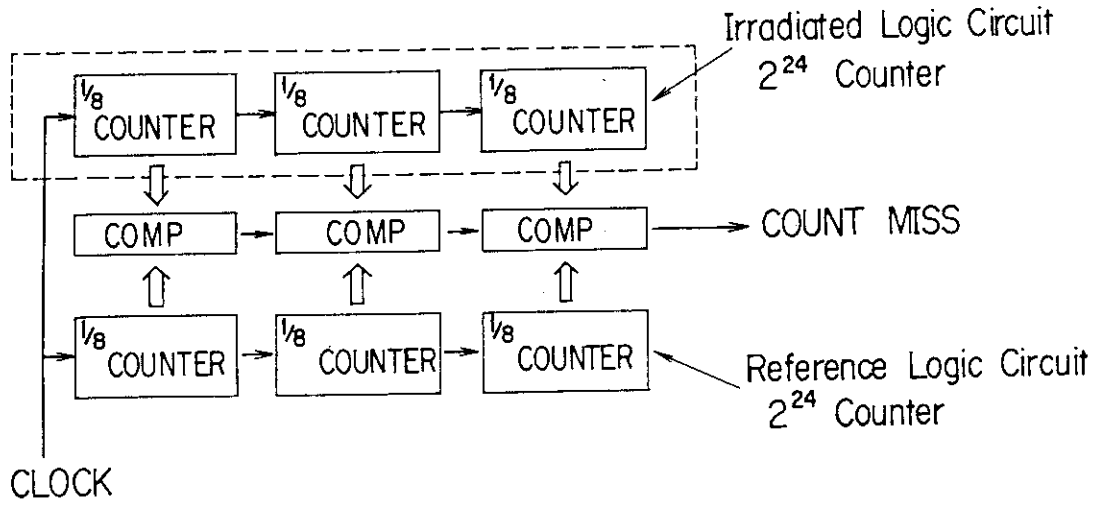


図 3.14 デジタル回の構成 カウンタ : TC 40 H 393

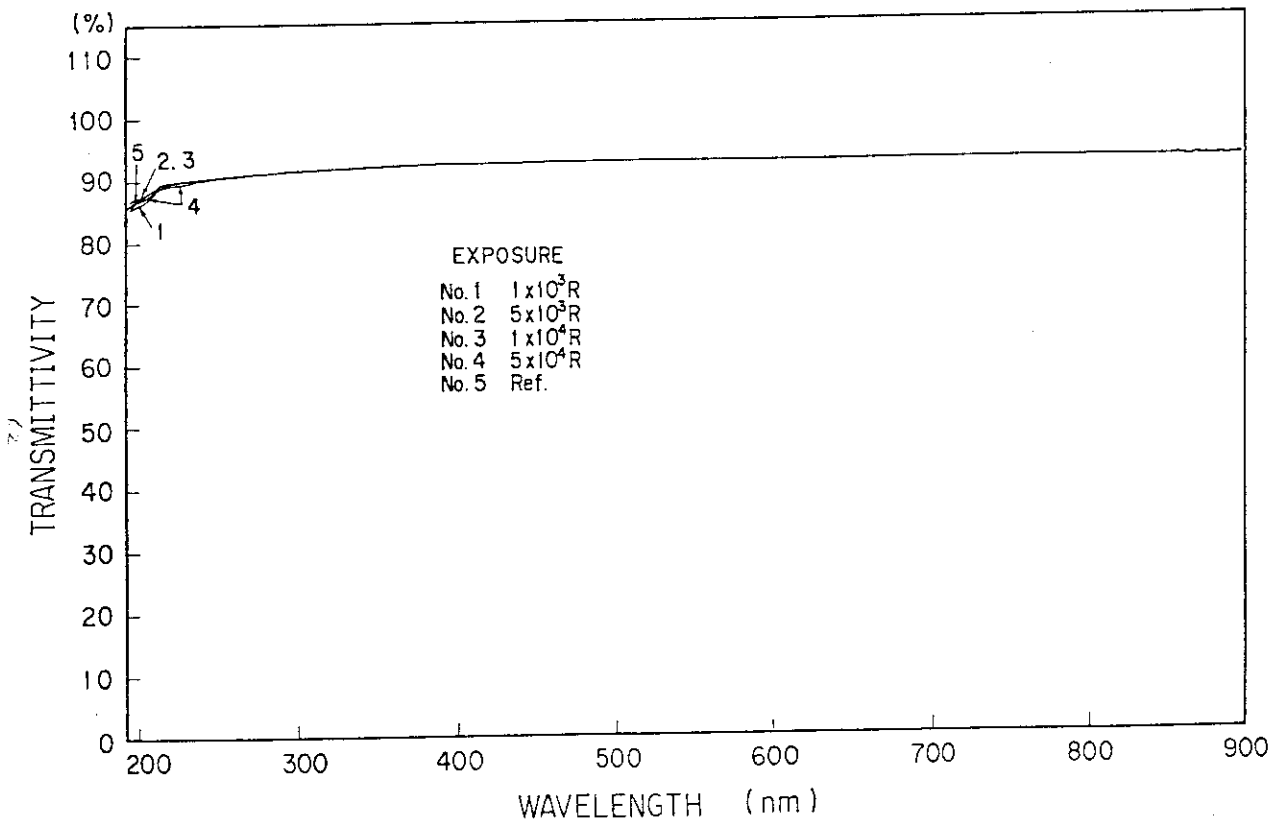


図 3.15 照射によるガラス面板の透過率変化 (石炭ガラス)

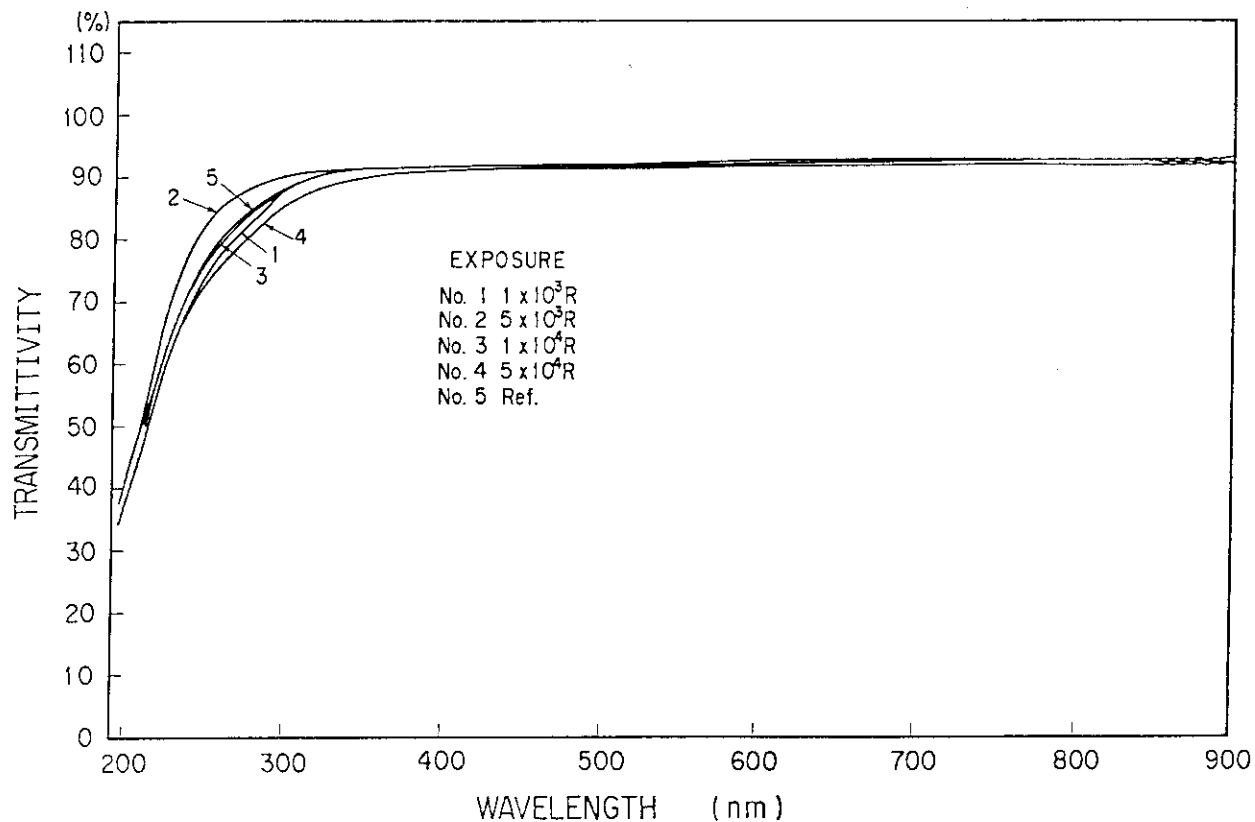


図 3.16 照射によるガラス面板の透過率変化 (UV ガラス)

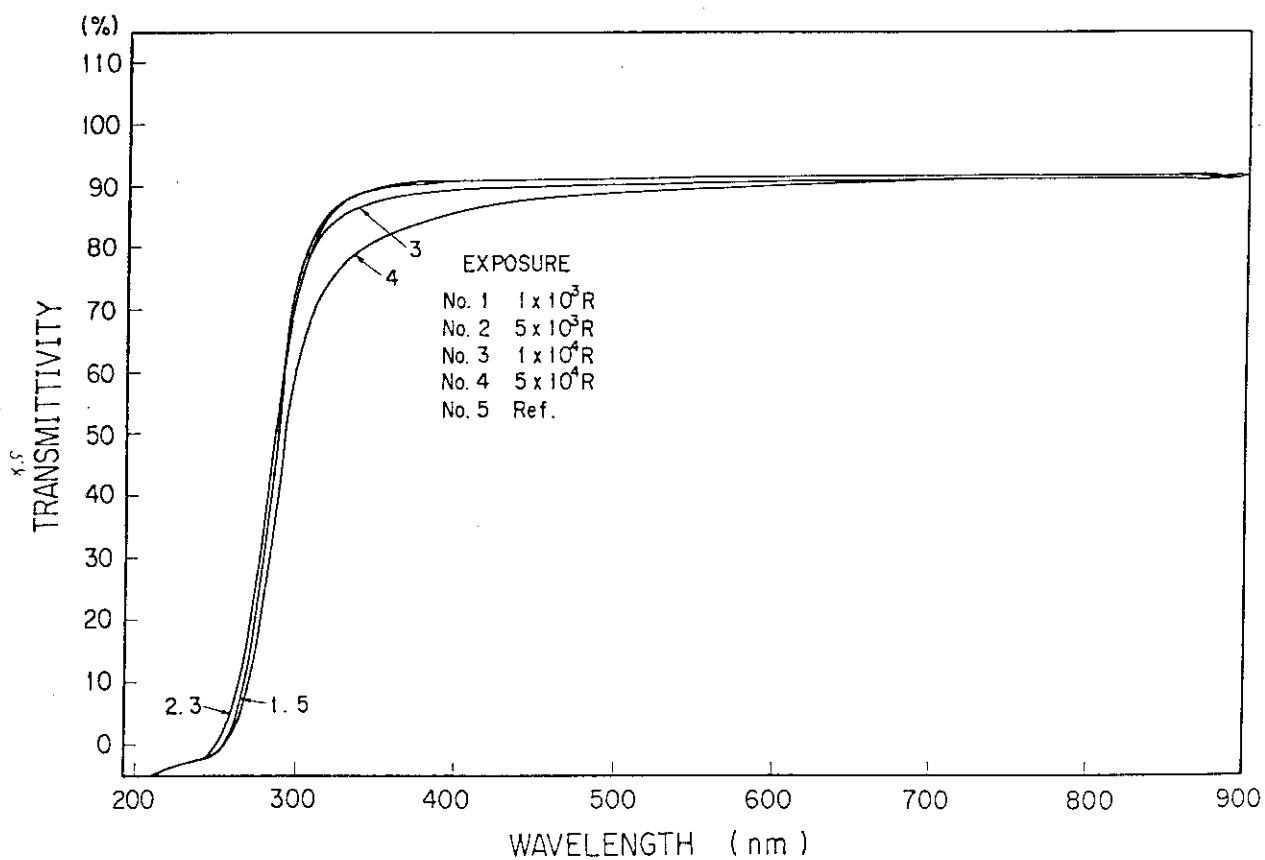


図 3.17 照射によるガラス面板の透過率変化 (硼硅酸ガラス)

4. JT-60分光計測用ミラー及び回折格子の ^{60}Co γ 線照射試験

4.1 概要

分光器の特性は、光学系機械的な配置が変わらなければ、光学素子と検出器の特性に依存する。もし光学素子の反射率や回折効率が低下すれば、トカマク内の不純物量が変化しなくとも測定される出力は小さくなり、トカマク内の不純物量が減少したという誤った情報を与えることになる。また光学素子の面程度が悪くなれば検出器面でのスペクトルの像巾が拡がり、ピーク強度は低下し、この場合にも分光器は誤った情報を与えることになる。

分光計測で用いる光学素子としては、回折格子、結晶、レンズ、ミラー、及び真空封止の窓がある。このうち透過型で用いるレンズ及び窓には、熔融石英が特性の変化が少なく適していることがわかっている。また結晶も単体で用いるので、 γ 線に対し安定と考えられる。回折格子とミラーは、ガラス上に接着剤で金属膜を接着したり、金属薄膜を蒸着した複層構造を持つため、 γ 線による劣化があるとすれば、この両者に生ずるであろうと思われる。そこで、回折格子とミラーについて γ 線の照射実験を行なうことにした。

光学素子の特性として測定すべき項目は、回折効率、反射率、および面程度がある。これ等の特性は、非可逆的な蓄積型の変化を示すと考えられるので、 γ 線照射の前後での特性の差をみればよい。そこで照射実験はオフライン実験とした。

4.2 測定と結果

4.2.1 Al + MgF₂ ミラーの測定及び結果

このミラーは、A-4-b および e のサブシステムで使用する。2つのサブシステムはいずれも基礎架台に設置される。したがって、予想される照射線量は $1 \times 10^3 \text{ R/life}$ である。A-4-b のサブシステムで対象とする波長域は 100 nm ~ 240 nm、また A-4-e のサブシステムでは 200 nm ~ 700 nm である。このうち可視光領域は外観とあわせて容易に変化が観察できるので、真空紫外域での反射率の測定を行った。試料および測定内容を次に示す。

試料	Al + MgF ₂	ミラー	1個
寸法	58 mm × 58 mm, 厚さ 8 mm		
曲率半径	500 mm		
γ 線照射線量	$5 \times 10^3 \text{ R}$ (線源より 60 cm, 1時間照射)		
反射率測定	真空ダブルスペクトロメータにより、各波長ごとに入射光量と反射光量の比を測定。		
光源	He および N ₂ ガスの放電発光スペクトル		
検出器	サリチル酸ソーダ板と光電子増倍管 (HPK 製 6199)		

γ 線を照射する前後での反射率の測定結果を図 4.1 に示す。図中、50 nm から 130 nm 付近ま

でを He の放電で、100 nm から 250 nm までを N₂ の放電によるスペクトルで測定している。測定装置の構造上、入射光量と反射光量の測定を同時にできないため、光源の変化などにより、測定の精度はあまりよくない。しかし測定結果は、50 ~ 200 nm の範囲で良く一致しており、 γ 線照射による変化はないといえる。なお、測定日は、 γ 線照射前の入射光量が 1ヶ月前、反射光量が 3週間前、照射後は入射光量が 1週間後、反射光量は翌日であった。

4.2.2 回折格子の測定及び結果

回折格子は A 4 システムで 5 台の分光器に用いられる。このうち、 γ 線照射量が最も多いのは、I N₂ ポートにつく A 4 - a サブシステムで、予想される線量は 6.4×10^4 R/life である。回折格子は、いずれもガラス基板の上にエポキシ樹脂層のレプリカ面があり、その上に所定の金属 (Pt あるいは Al) がコートしてある。ここでは、実験用として A 4 - a サブシステムで用いると同じ製造方法で作成した平面のホログラフィック回折格子を用い、 γ 線の照射前後での回折効率と面程度を測定した。また、 γ 線の照射による変化を測定誤差と区別するため、照射時には回折格子の半分を鉛でしゃへいし、変化の有無をみるようにした。 γ 線照射時の配置を図 4.2 に示す。

試料および測定の内容を次に示す。

試料	回折格子 (Pt コート) 2個
寸法	58 mm × 14 mm, 厚さ 8 mm, 平面
γ 線照射線量	4.4×10^4 R (直接露出部) 3.6×10^3 R (鉛しゃへい部) 線源より 42 cm, 5時間照射
外観観察	照射 1時間, および 5時間での変化をみる。
回折効率	回折格子上の 3点 (図②でそれぞれ右, 中, 左と印した黒点位置) で He - Ne レーザ光の 1次と零次の光量の比を測定。
面程度	トワイマン・グリーン干渉計 (光源は He - Ne レーザ) で回折格子の零次の波面の変化を測定。

2 個の回折格子は、その格子の深さが異なり、したがって、回折効率が異なるものを選んである。溝の深さは、可視光に対しては浅く、He - Ne レーザでの回折効率は小さいが、A 4 システムで測定しようとする波長域に対して適当な深さとなっている。

回折格子の外観は、 γ 線の 1時間照射では変化は認められず、また 5時間照射では直接露出部のガラス基板が黄土色に着色したが、回折格子表面は変化が認められなかった。

回折効率の測定結果を表 4.1 に示す。G 2 で γ 線照射前後の測定に差があるが、鉛のしゃへいの有無によらず同程度の差であり、測定系のセッティング誤差と考えられる。G 1 の測定値は照射前後でほとんど差がなく、これもあわせて、回折効率に γ 線の照射による変化は認められない。

面程度の様子を図 4.3 に示す。G 1, G 2 の回折格子について、 γ 線照射前後の零次の波面を測定した。波面検査では、干渉縞の曲がり量の変化や段差が発生すると、それが分解能の低下を示すものとして識別される。今回の実験では、こうした変化は認められなかった。

4.3 考 察

JT-60 で想定される γ 線量と、今回の実験での照射線量を比較すると、Al + Mg F₂ ミラーについては今回の照射線量が5倍、また回折格子については半分である。これは、時間になおすと、回折格子でも5年分以上の線量に相当する。通常、真空中で使用する光学素子では、光学素子表面に残留する不純物が焼き付き、それにより反射率が低下したり、場合によっては上昇することが知られている。こうした変化は、真空度や入射光量により一概には言えないが、1年あるいは2年という単位でその変化が確認できる。したがって、ミラーや回折格子でその反射率や回折効率に変化が生じたとしても、 γ 線がその原因であるということは、あまり考えなくても良いと思われる。

次に個々の測定データについて少し検討する。ミラーの反射率は200nmより長波長側で、 γ 線照射後に10%以上増加したような結果となっている。このような変化はたとえば表面に付着していた物質が除去されたり、逆に薄膜が形成された時に生じる。しかし前者であれば、反射率の増加が全波長域で認められ、後者であれば、反射率は波長の変化に対して振動する。今回の測定結果はこのいずれの場合にもあてはまらない。したがって、この反射率変化は測定時における光源の条件の変化を示しているものと考えられ、 γ 線照射によるものとは思われない。

回折格子の効率、面程度、外観にも、特に変化は認められない。回折格子は複製（レプリカ）であり、その製作工程で接着剤や剥離剤を使用する。これ等のものが γ 線によって変化することが考えられるので、今回の実験を行ったが、結果からは、この程度の γ 線照射では変化は認められなかった。

以上の結果より、ミラー及び回折格子とも、JT-60 で想定される γ 線量では特性の変化は認められず、十分安定と考えられる。むしろその他の原因、たとえば不純物の付着や経年変化のほうが性能を低下させる要因として大きいと思われる。

表 4.1 γ 線照射前後の回折効率

回折格子	γ 線照射	回折効率の比（1次/零次, %）		
		左	中	右
G 1	照射前	0.61	0.79	0.73
	照射後	0.63	0.82	0.73
G 2	照射前	2.81	3.49	3.15
	照射後	2.57	3.33	2.96

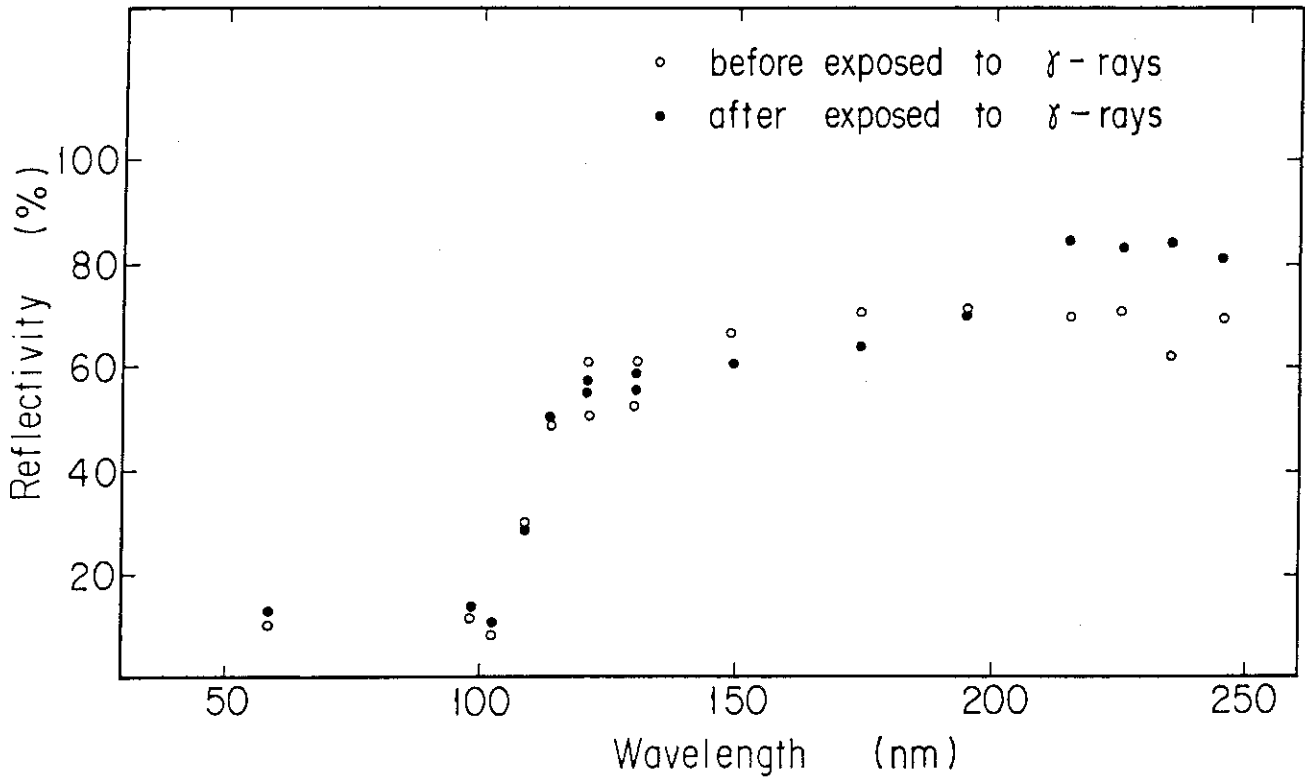


図 4.1 Al+MgF₂ ミラー γ 線照射前後の反射率の波長特性

Holographic grating

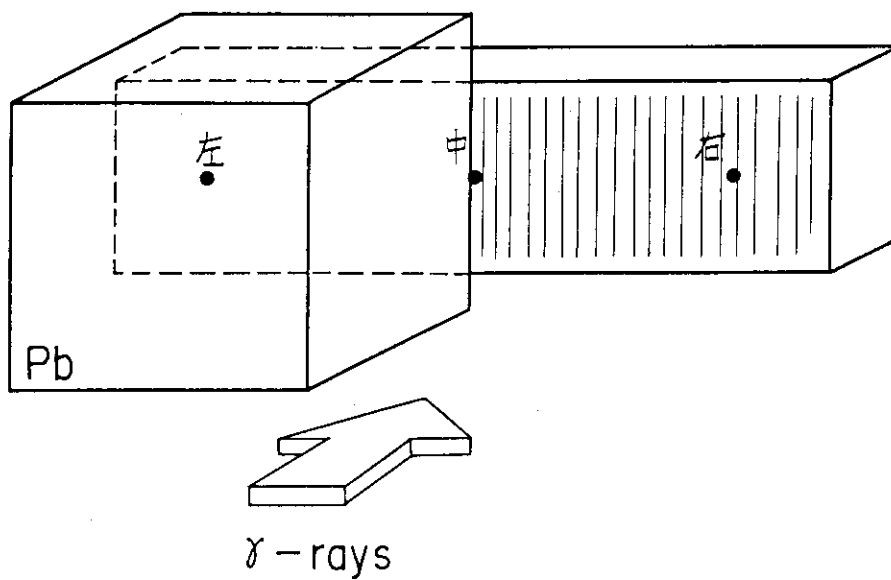
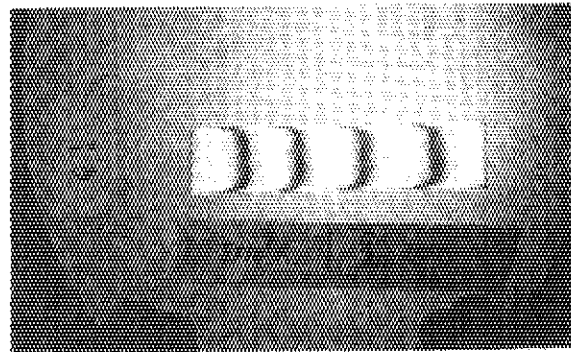
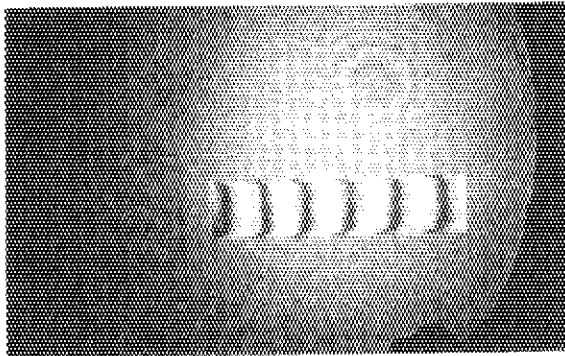
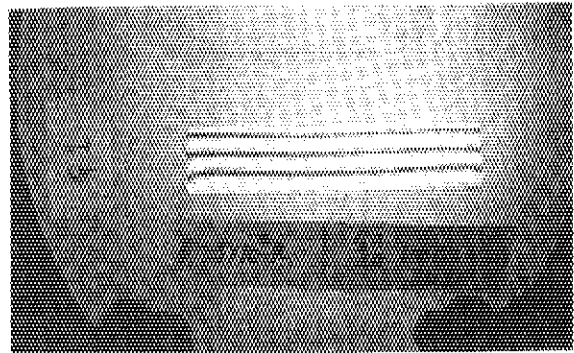
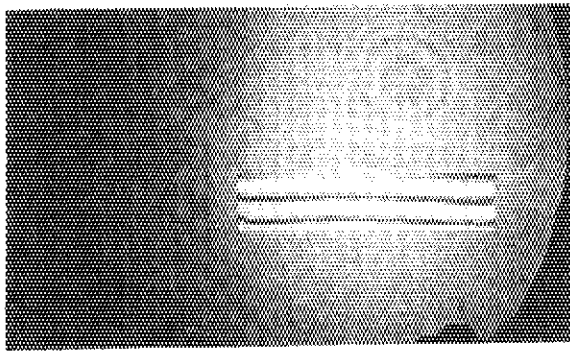
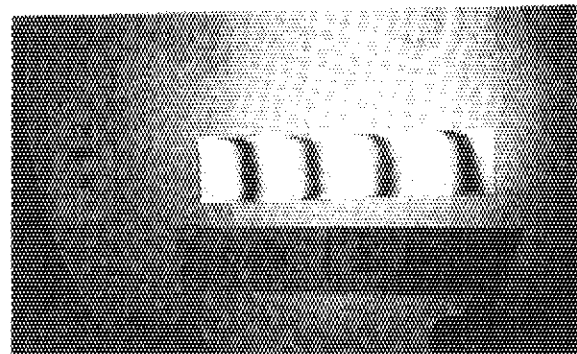
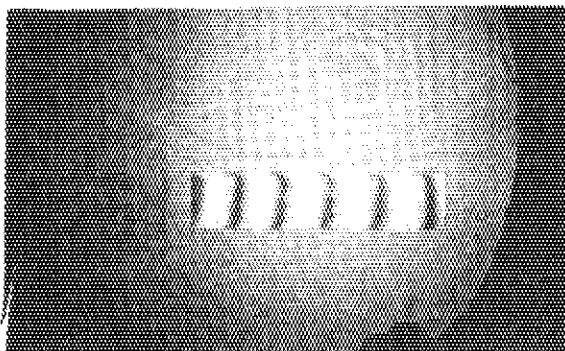
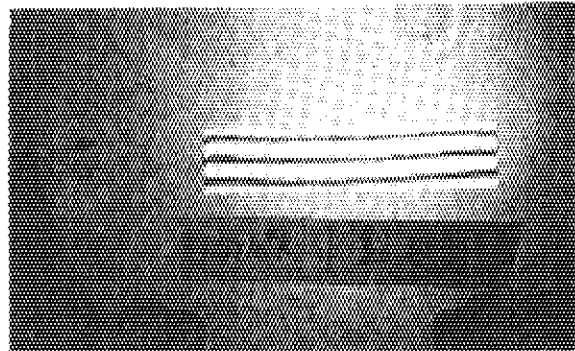
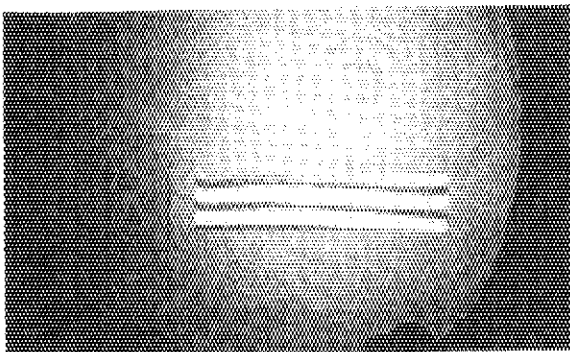


図 4.2 ホログラフィック回折格子 γ 線照射時の配置図



a) 回折格子G1, r 線照射前

b) " " r 線照射後



c) 回折格子G2, r 線照射前

d) " " r 線照射後

図4.3 干渉計による波面検査

5. JT-60計測用光学ガラスの中性子照射試験

5.1 概要

JT-60において、光学ガラスは計測ポートの窓材や可視テレビのレンズなどに用いられるが、このような場所は、検出器など他の計測機械に比べて、プラズマに近く、さらにこれらの物は直接プラズマを見込んでいるため、プラズマからのX線や中性子など放射線の影響を受けやすい。

光学ガラスの γ 線照射効果の研究は以前から行われており、 γ 線を照射しても着色が起こらない、いわゆるノンブラウンガラスが開発され、ホットラボなど原子力施設で広く使用されている。しかしこれまでの原子力施設では、原子炉などの中性子発生源の中を光学的に見るといことがほとんど無かったせいか、光学ガラスの中性子照射効果に関する研究はほとんど行われていない。ところが、JT-60などの核融合実験装置では分光測定などの光学的計測法は重要なプラズマ診断法であり、光学ガラスの窓やレンズは不可欠なコンポーネントである。JT-60ではD-T反応は行わないが、逃走電子モード時に (γ, n) 反応より中性子が発生することが予想されている。そこで、ここでは、通常の光学ガラスと、ノンブラウンガラスについて中性子照射による透過率特性の変化を測定した。

中性子照射は東京大学工学部附属原子力工学研究施設の高速中性子源炉「弥生」にて行った。

5.2 試験及び構成

5.2.1 照射試料

照射に用いた光学ガラスの種類を表5.1に示す。ここで n_d はd線(波長587.6nm)、 ν_d はアツベ数である。

B, SC 7 N, F 2 N, BAC 4 N, DC 10 G 10は CeO_2 を含有させることにより、放射線による着色を少なくしたノンブラウンガラスである。

試料の寸法は10mm×12mm×30mmで12mm×30mmの2つの面を光学研磨している。

5.2.2 照射方法

中性子照射を行った高速度中性子源炉「弥生」の構造と炉心部の詳細構造をそれぞれ、図5.1、図5.2に示す。試料はアルミパイプの照射治具の先端に取り付けられ、グレーディング孔という炉心近傍を垂直に貫通する照射孔の中心まで挿入して照射を行った。

この照射孔における中性子エネルギースペクトルを図5.3に示す。エネルギースペクトルは約0.5MeVを中心とする連続スペクトルで、核分裂スペクトルよりやや軟かくなっており、エネルギー範囲としては、JT-60で想定されている (γ, n) 中性子と同程度と考えてよい。

各試料に照射された中性子の量は、試料にニッケル箔法により求めた。着目した反応は $^{58}Ni(n, p)^{58}Co$ で、 ^{58}Co の崩壊による0.81MeVの γ 線をGe(Li)半導体検出器により測定

した。これより求めた精算中性子束と同時に照射されたと想定される γ 線の照射線量を表 5.2 に示す。

5.2.3 測定方法

日立 624 形デジタル分光光度計により照射前と照射後の透過率を測定した。測定波長域は 300 ~ 700 nm (近視外~可視域) である。BSC 7, BSC 7NF 2, F 2N, BAC 4, BAC 4N の 6 種については照射後 1 日, 7 日, 40 日の 3 回測定し, DC 10 および DC 10G 10 は照射後 40 日に 1 回測定を行った。

5.3 実験結果

中性子照射前後の透過率測定の結果を図 5.4 ~ 図 5.11 に示す。CeO₂ を含有する, ノンブラウンガラス, BSC 7N, F 2N, BAC 4N, DC 10G 10 は, 中性子照射による透過率の変化は認められなかった。これに対し, CeO₂ を含有しない, BSC 7, F 2, BAC 4, DC 10 は中性子照射による著しい透過率の低下が見られた。約 350 ~ 700 nm の範囲では, 短波長ほど透過率の低下が大きくなっている。また照射後, 時間とともに, 徐々にではあるが, 透過率の回復, つまり退色が認められた。

図 5.2 からわかるように, 原子炉による中性子照射では, 中性子ばかりでなく γ 線の照射も行われてしまう。そこで, 中性子と γ 線それぞれの寄与を見積るため, BSC 7, F 2, BAC 4 の ⁶⁰Co γ 線照射による透過率変化と照射後の回復データを図 5.12 ~ 図 5.17 に示す。照射線量は 1×10^3 R, 1×10^4 R, 1×10^5 R の 3 通りである。図 5.12, 図 5.14, 図 5.16 から想定すると, 中性子照射に伴う γ 線の照射線量 ($1 \sim 6 \times 10^2$ R) では透過率の変化はわずかであることがわかる。したがって, 中性子照射の場合の透過率変化はほとんど中性子の影響によって起っていると考えてよい。また, 照射後の透過率の回復の速度は中性子照射と γ 線照射でほとんど差がなかった。

5.4 考察

γ 線照射による着色を防止したノンブラウンガラスは中性子照射によっても着色がほとんどないことがわかった。ノンブラウンガラスは CeO₂ を添加することに γ 線による着色を防止しているが, その機構は次のようにいわれている。

光学ガラスに γ 線が照射されると, 光学ガラス中に電子と正孔が生成し, カラーセンターを形成して着色する。ところが CeO₂ を添加すると, Ce はガラス中で Ce³⁺ と Ce⁴⁺ となり, Ce³⁺ は正孔の捕獲中心として働き, Ce⁴⁺ は電子の捕獲中心として働く。Ce³⁺ + 正孔および Ce⁴⁺ + 電子の吸収帯はともに紫外部であるので可視部に対しては着色がなくなる。

中性子照射の場合, 中性子は原子核とだけ相互作用を持ち, 核外電子との直接の相互作用はない。しかし, 中性子の弾性散乱や非弾性散乱により反跳された原子核や (n, p), (n, α) などの反応により生成した荷電粒子は反応後, 高速でガラス中を走るため, その飛跡周囲に電子,

正孔対を作り出す。このように中性子照射の場合も2次的ではあるが、電子、正孔が生成される。CeO₂を添加したノンブラウンガラスが中性子照射によっても着色しなかったことから、中性子照射の場合の着色はこのような電子、正孔によって起きると考えられる。

中性子による損傷は上記のように、原子核などの荷電粒子が走ることによって起こるため、電子-正孔対ばかりでなく、格子間原子の生成などのような原子の再配置が起っているはずである。今回の測定は可視域を中心に行っているが、他の波長域まで測定すれば、ノンブラウンガラスでも、原子の再配置による吸収が現れているかもしれないので今後測定波長域を広げた測定が必要と思われる。

表 5.1 照 射 試 料

型 番	種 類	n_d	ν_d
BSC 7 BSC 7N	硼硅クラウンガラス	1.5168	64.2
F 2 F 2N	フリントガラス	1.6200	36.3
BAC 4 BAC 4N	バリウムクラウンガラス	1.5688	56.0
DC 10 DC 10G 10	重バリウムクラウンガラス	1.6228	56.9

表 5.2 照射中性子束と γ 線の照射線量

ガラスの種類	中性子 積算中性 子束 (n/cm^2)	γ 線 照射線量率 (R)
BSC 7 BSC 7N F 2 F 2N	7.4×10^{11}	1.0×10^2
BAC 4 BAC 4N	1.0×10^{12}	1.3×10^2
DC 10 DC 10G 10	4.3×10^{12}	6.0×10^2

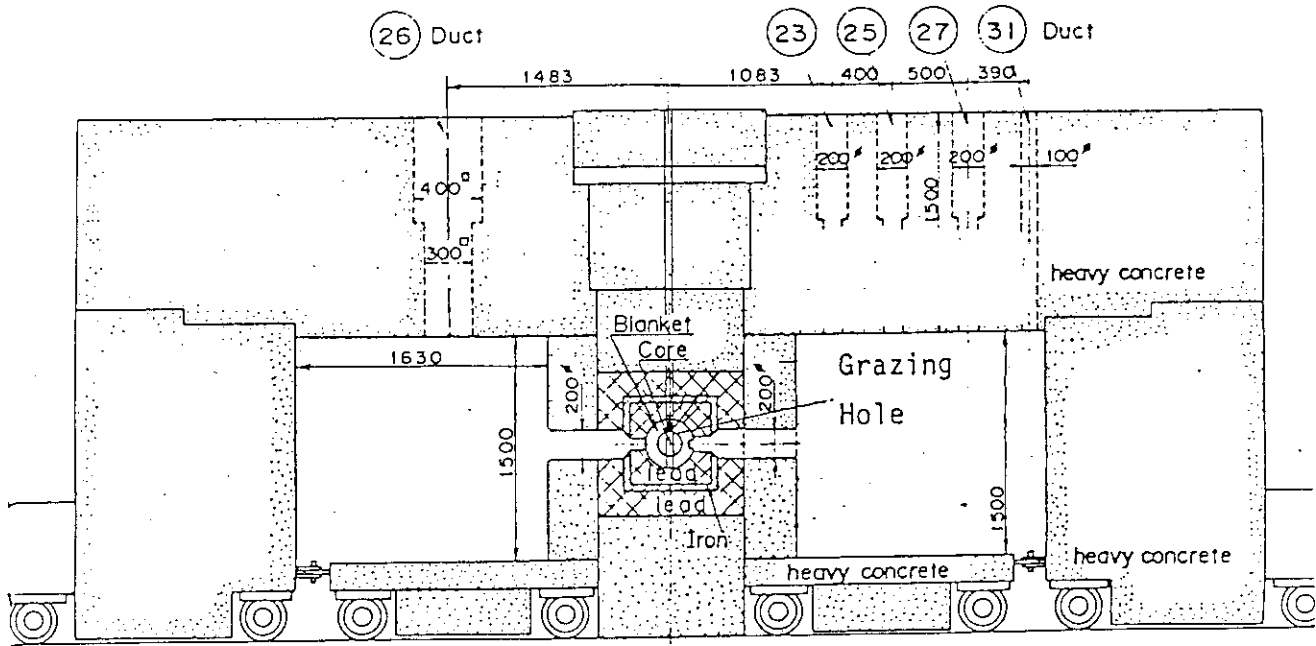


図 5.1 高速中性子源炉「弥生」1の構造

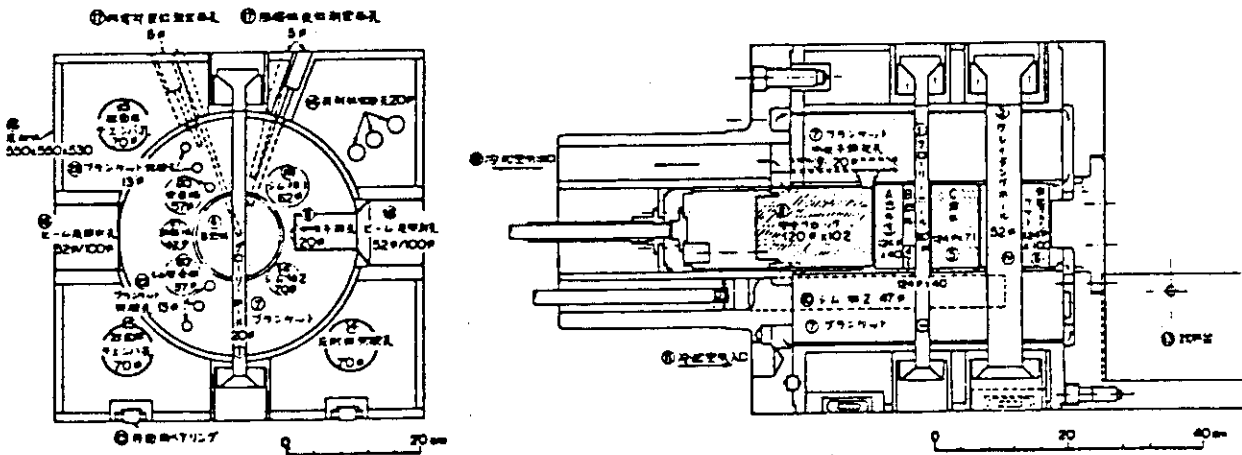


図 5.2 高速中性子源炉「弥生」炉心部の構造

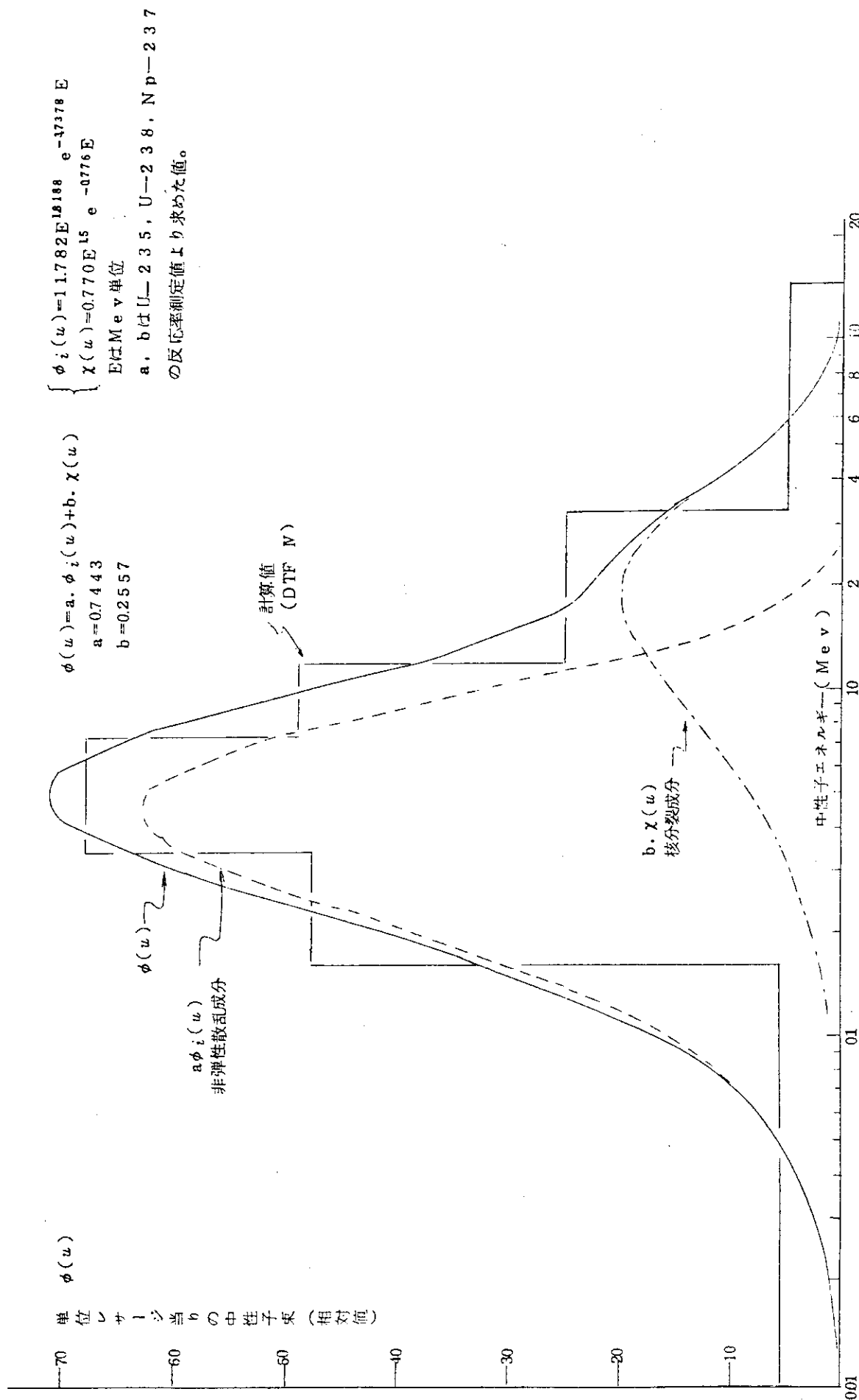


図 5.3 「弥生」グレージング孔の中性子エネルギー

スペクトル

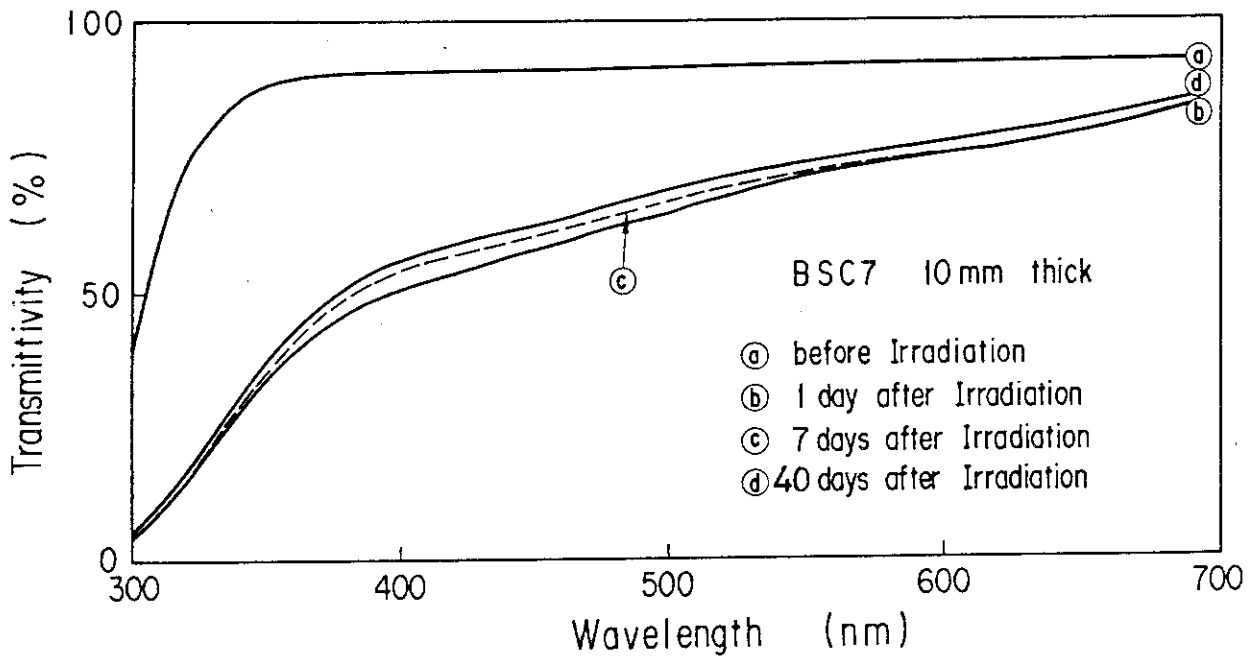


図 5.4 中性子照射による透過率変化 (BSC 7)

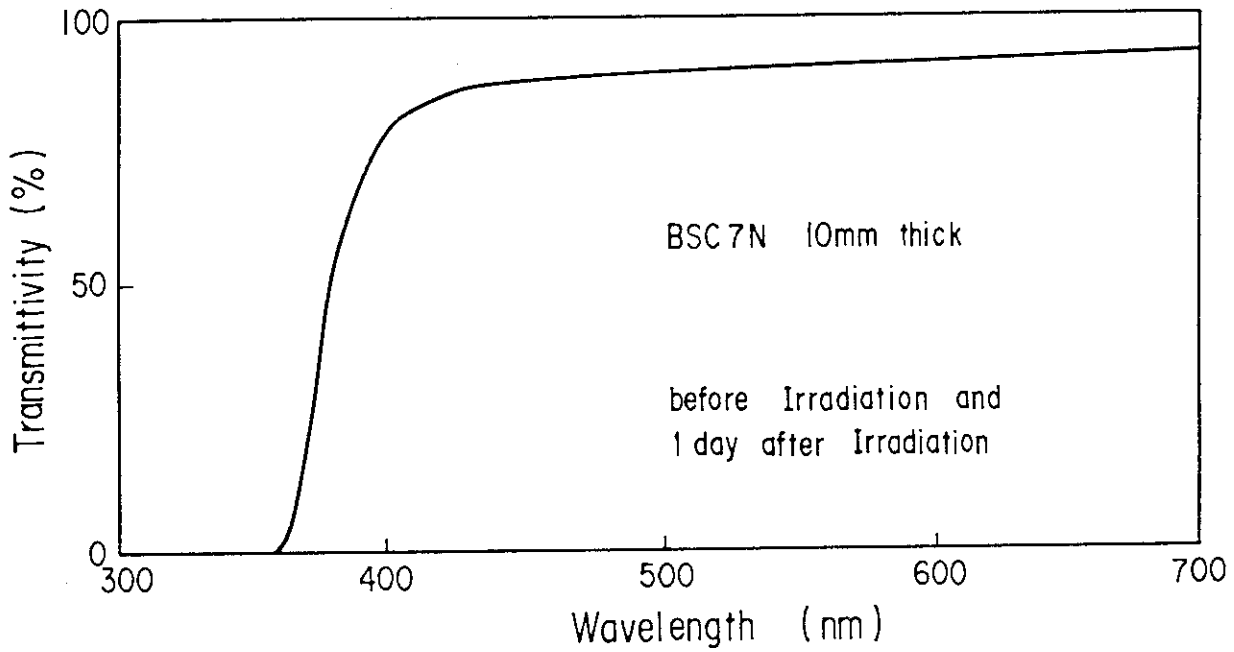


図 5.5 中性子照射による透過率変化 (BSC 7 N)

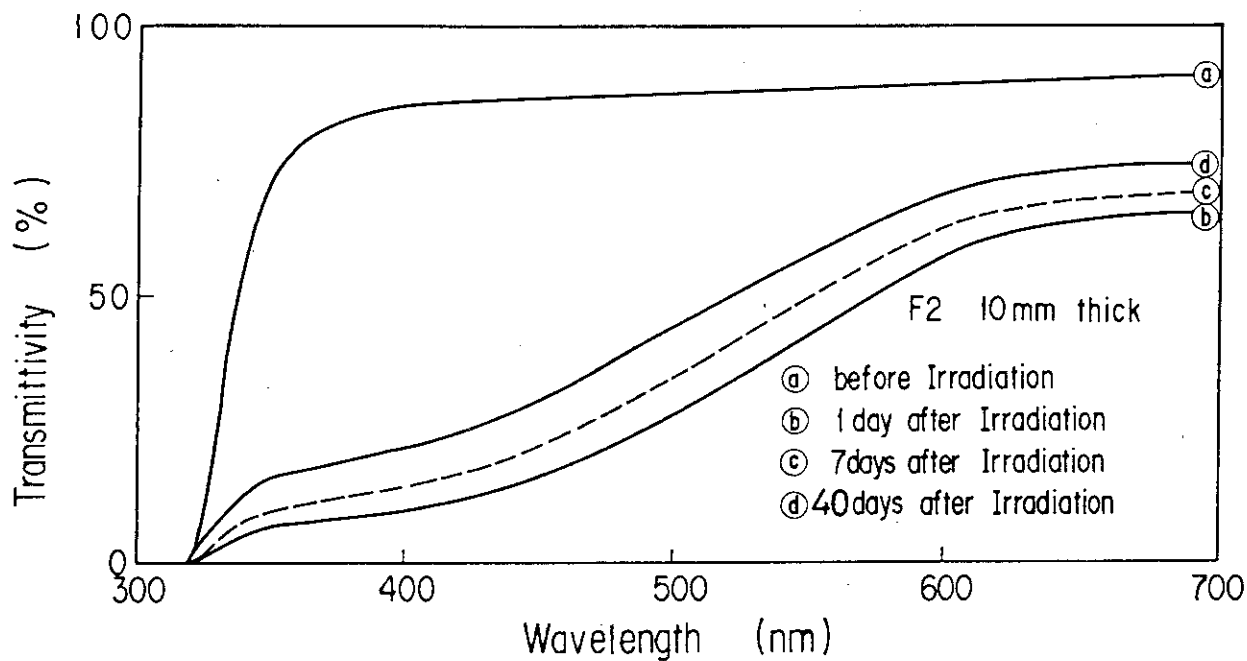


図 5.6 中性子照射による透過率変化 (F 2)

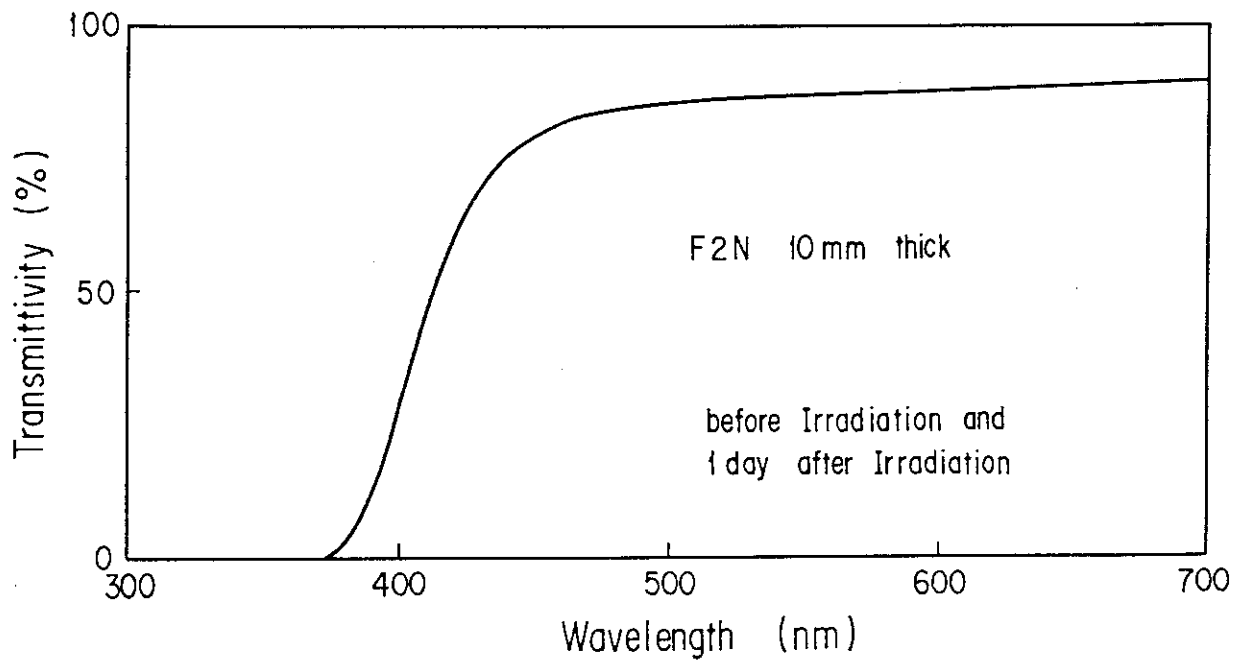


図 5.7 中性子照射による透過率変化 (F 2N)

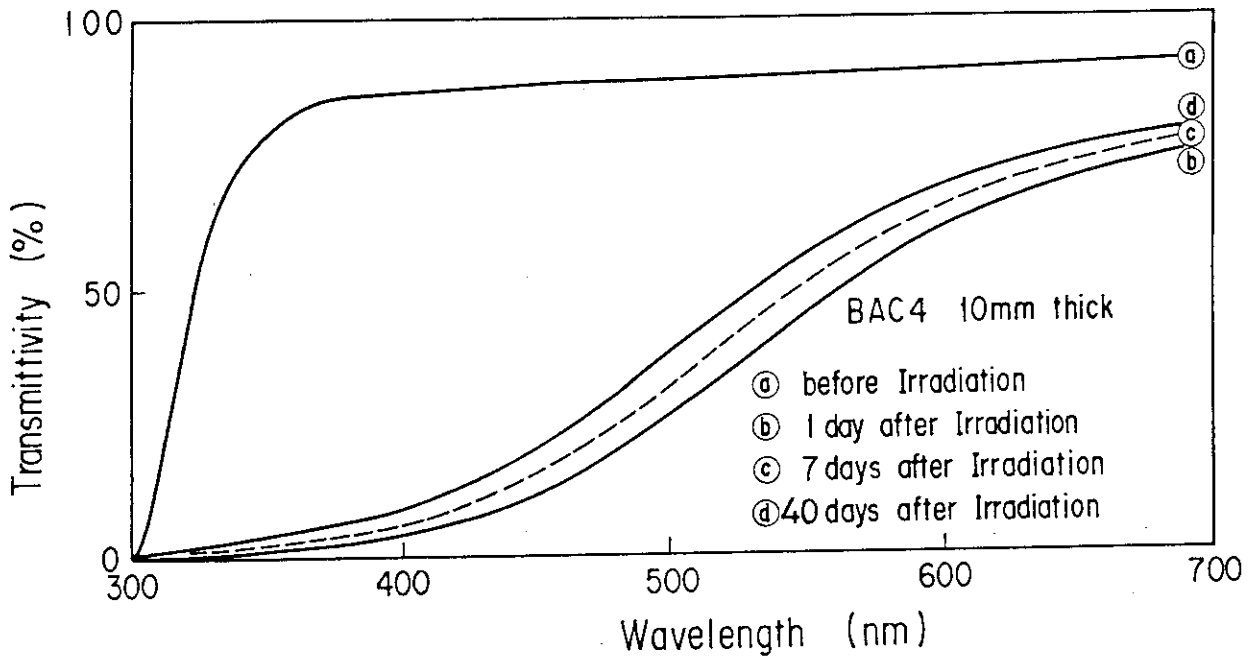


図 5.8 中性子照射による透過率変化 (BAC 4)

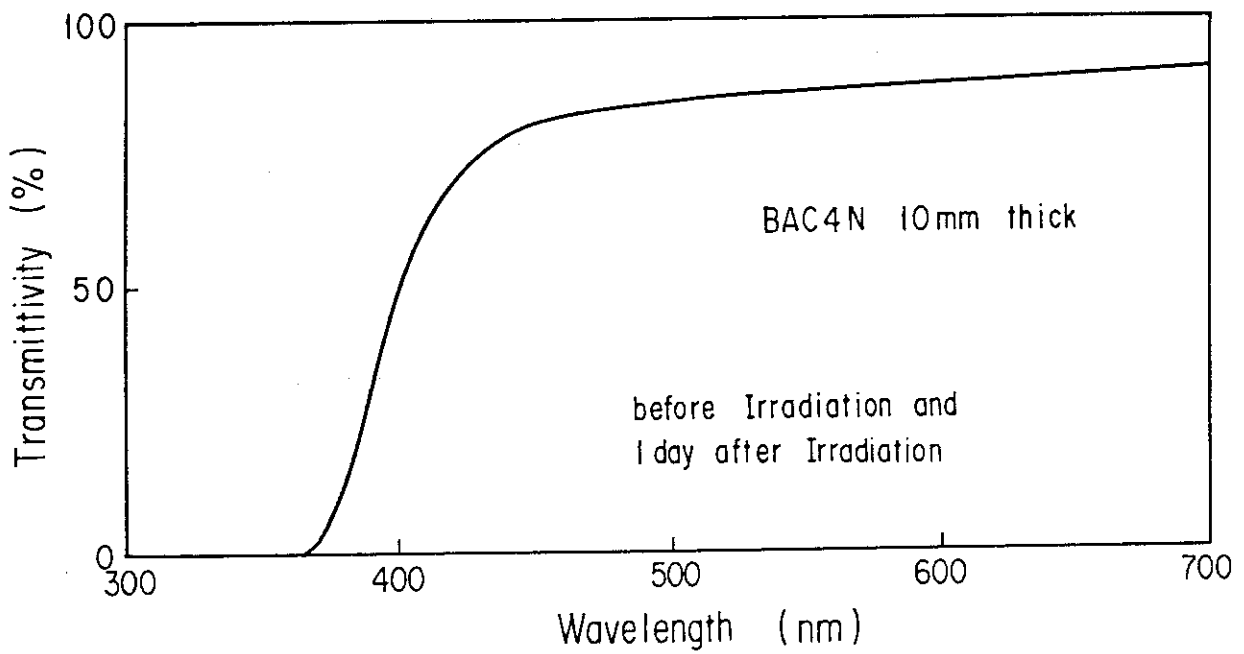


図 5.9 中性子照射による透過率変化 (BAC 4N)

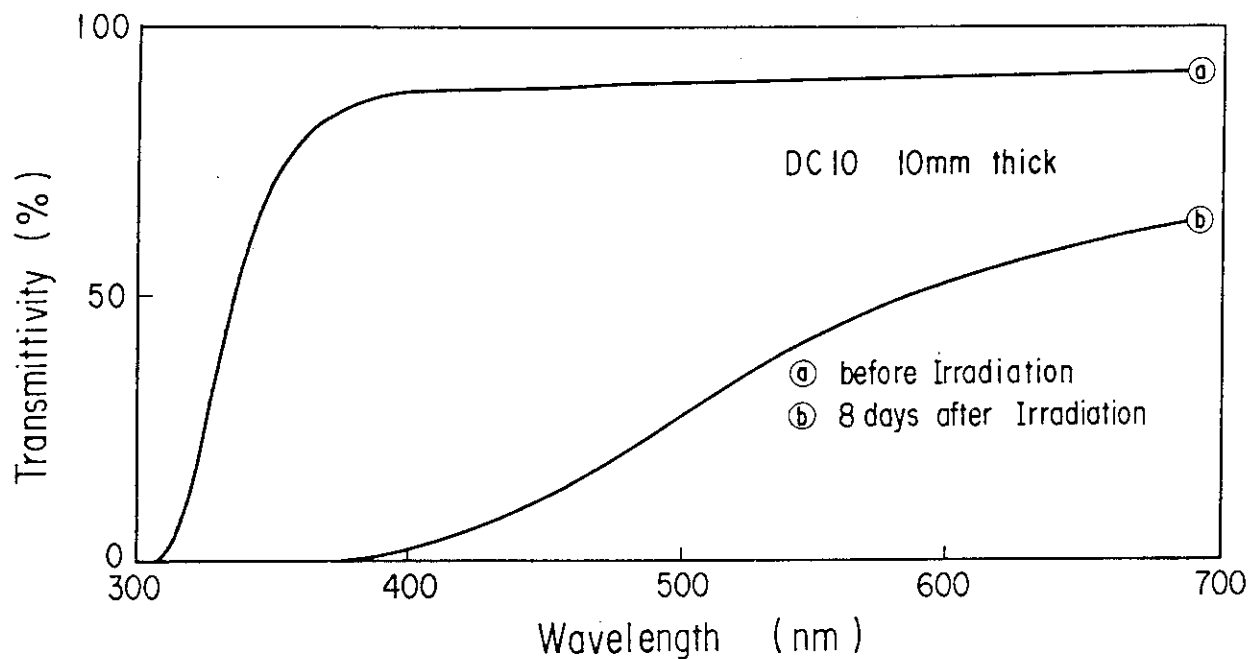


図 5.10 中性子照射による透過率変化 (DC 10)

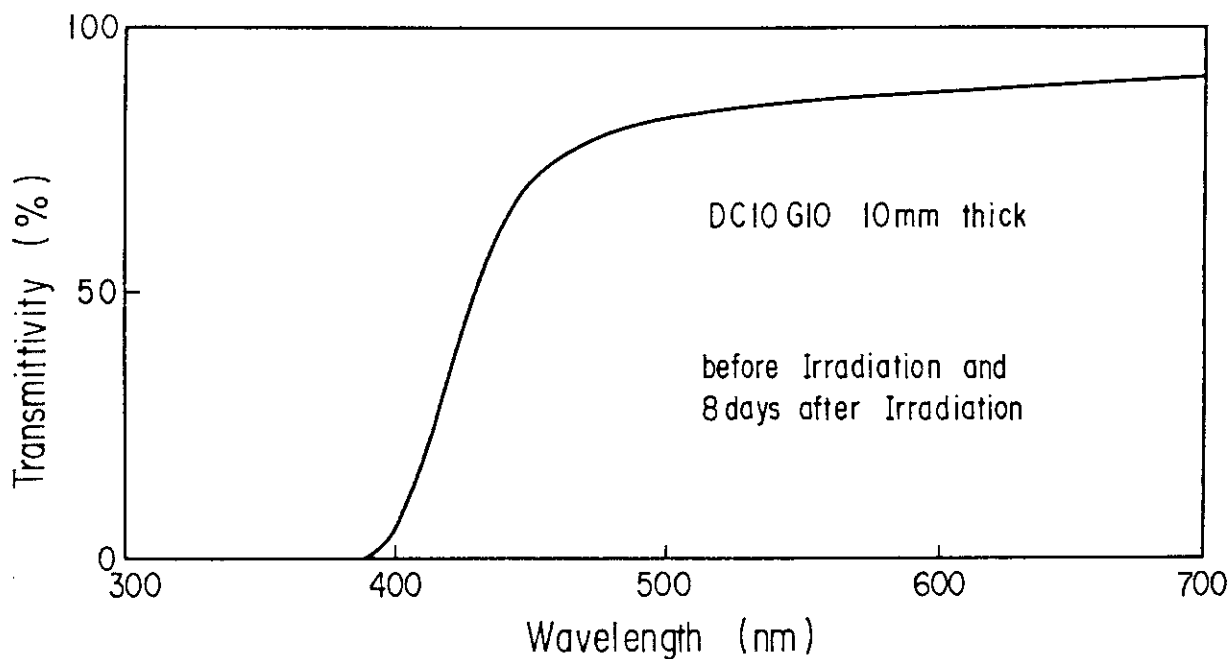


図 5.11 中性子照射による透過率変化 (DC 10 G 10)

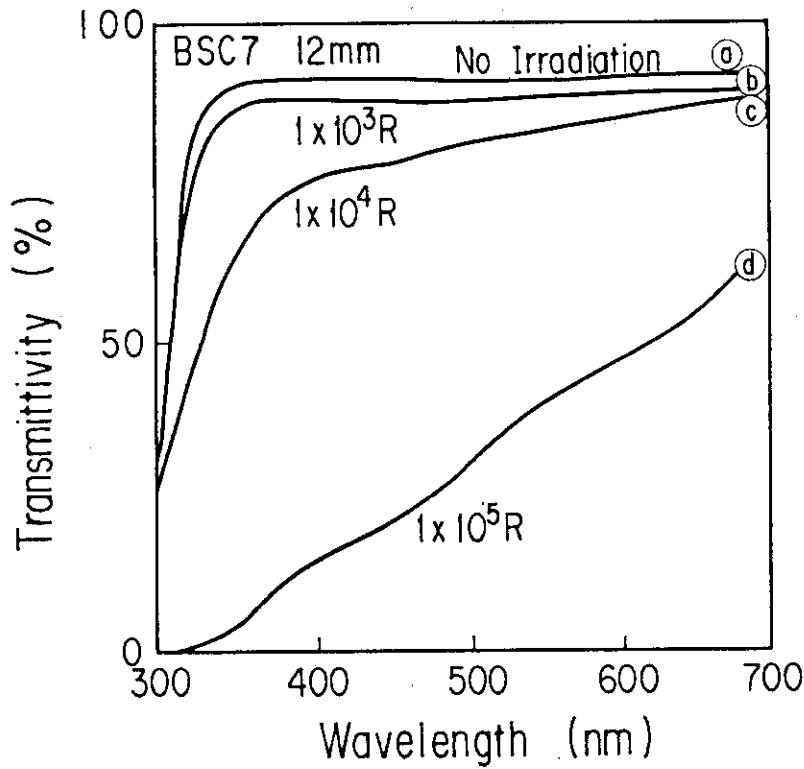


図 5.12 γ 線照射による透過率変化 (BSC 7)

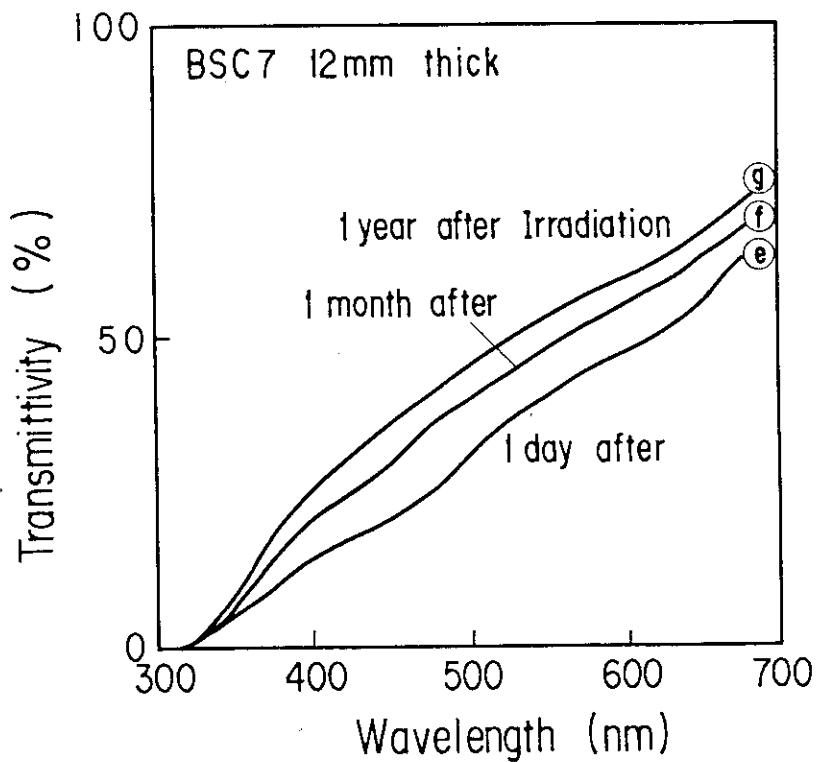


図 5.13 γ 線照射後の透過率変化 (BSC 7)

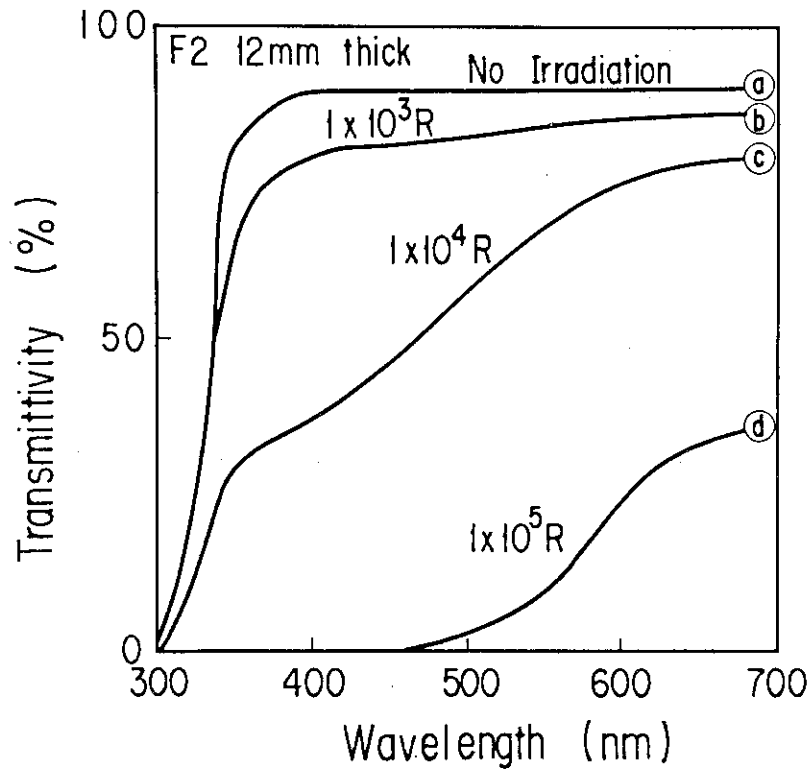


図 5.14 γ 線照射による透過率変化 (F2)

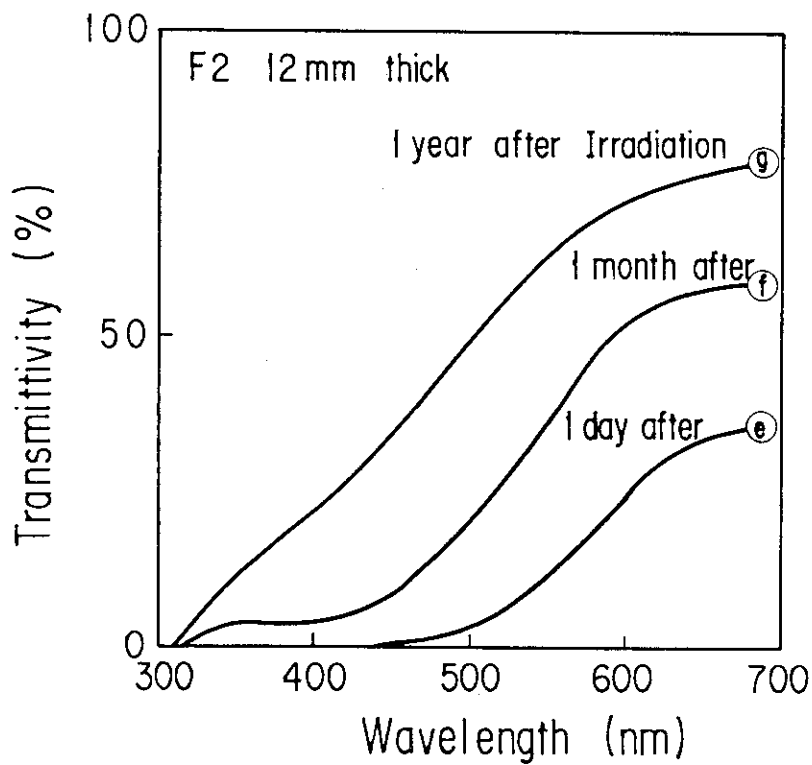


図 5.15 γ 線照射後の透過率変化 (F2)

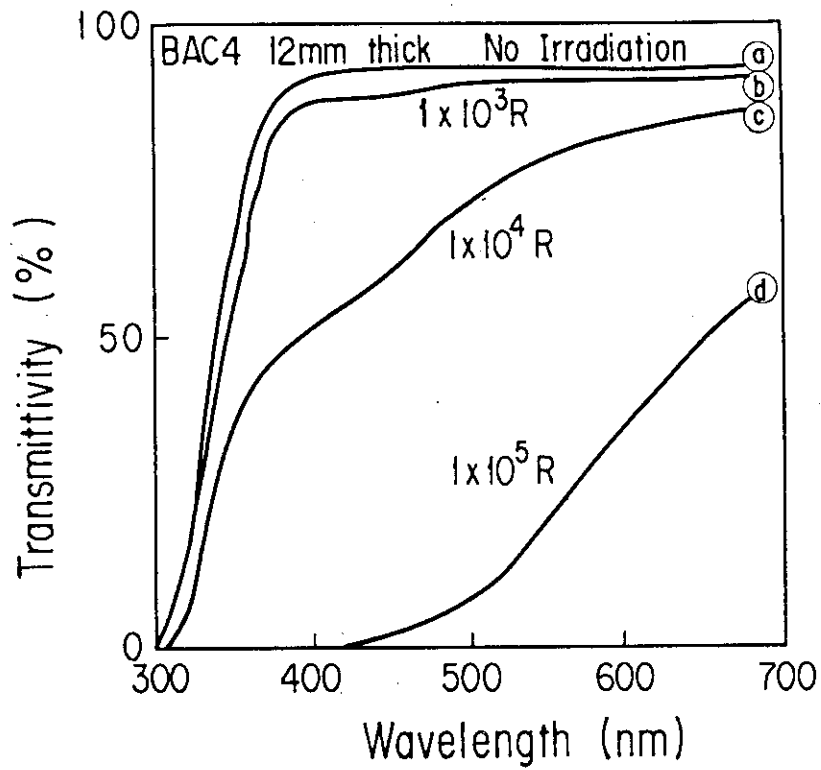


図 5.16 γ 線照射による透過率変化 (BAC 4)

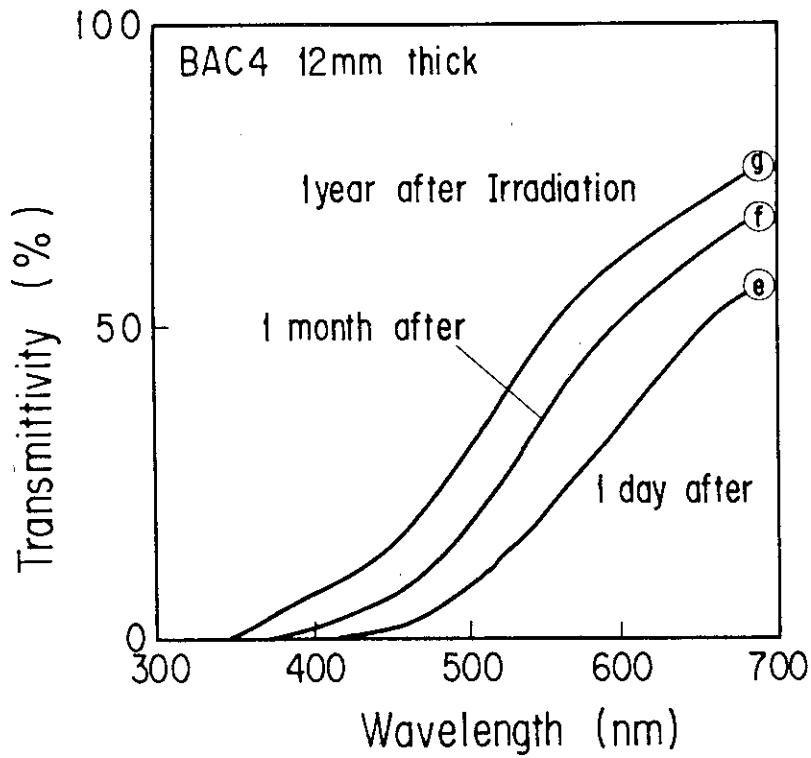


図 5.17 γ 線照射後の透過率変化

6. ま と め

本実験のまとめ、および各機器をJT-60にて使用する際の問題点、注意を要する点を以下に述べる。

- (1) PMTでは 10^3 R/hの照射線量率で約 $1 \mu\text{A}$ の電流が出力されていることがわかった。したがって逃走電子モード時には、 γ 線による出力が信号レベルをはるかに上回り、分光測定が行えないことが想定される。
またPMTの暗電流は照射により増加する。90 R/hで7分照射した場合、暗電流が元のレベルに戻るまでに数10分を要しており、JT-60における使用において、一度、逃走電子モードの発生すると、その後、数ショットまで影響が残ると思われる。
よって、逃走電子モード時の硬X線の影響を少なくするには、十分なX線遮蔽が必要である。
- (2) SPDは 10^3 R/hの照射線量率で $0.1 \sim 1 \text{ nA/mm}^2$ の出力電流があり、出力電流は照射線量率に比例している。また 10^4 R以下では特性変化は見られなかったが、 10^5 Rのオーダーで暗電流が増加し、感度が増している。よってSPDの寿命は 10^4 R程度と推定される。
- (3) アナログ回路は約 10^5 R/hまで正常に動作したが、デジタル回路では 10^5 R/hでカウンターの一部が破壊した。今回の実験だけでは一概に言えないが、アナログ回路は放射線に比較的強くJT-60では問題がないと思われる。
- (4) 石英ガラス、UVガラス、硼硅酸ガラスの面板の照射試験において、石英ガラスは透過率がほとんど変化していなかったが、UVガラスと硼硅酸ガラスは300 nm以下で透過率の低下がみられた。したがって、できるかぎり石英ガラスを使用することが望ましい。
- (5) ミラーおよび回折格子は 4×10^4 Rまでの範囲では何の異状も見い出せなかった。したがって、これらの機器はJT-60において問題なく使用できる。
- (6) 光学ガラスの照射試験では、 γ 線による着色を少なくした、いわゆるノンブラウンガラスは、 10^{12} n/cm^2 程度の中性子に対しても着色しないことがわかった。

以上まとめると、PMTやSPDの光電変換素子は γ 線の影響を受けやすく、JT-60における使用の際は十分な硬X線遮蔽が必要であるが、他の機材は、種類を選べば、JT-60放射線環境程度では、ほぼ問題なく使用できると思われる。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、終始御支援していただいた苫米地頭大型トカマク開発部長、吉川允二大型トカマク開発部次長に深く感謝します。また有益な御意見、御指導をしていただいた鈴木康夫JT-60第3開発室室長、鷺野正光照射施設課課長に感謝します。さらに有意義なコメントをいただいたJT-60第3開発室各位に感謝致します。

6. ま と め

本実験のまとめ、および各機器を JT-60 にて使用する際の問題点、注意を要する点を以下に述べる。

- (1) PMT では 10^3 R/h の照射線量率で約 $1 \mu\text{A}$ の電流が出力されていることがわかった。したがって逃走電子モード時には、 γ 線による出力が信号レベルをはるかに上回り、分光測定が行えないことが想定される。
また PMT の暗電流は照射により増加する。90 R/h で 7 分照射した場合、暗電流が元のレベルに戻るまでに数 10 分を要しており、JT-60 における使用において、一度、逃走電子モードの発生すると、その後、数ショットまで影響が残ると思われる。
よって、逃走電子モード時の硬 X 線の影響を少なくするには、十分な X 線遮蔽が必要である。
- (2) SPD は 10^3 R/h の照射線量率で $0.1 \sim 1 \text{ nA/mm}^2$ の出力電流があり、出力電流は照射線量率に比例している。また 10^4 R 以下では特性変化は見られなかったが、 10^5 R のオーダーで暗電流が増加し、感度が増している。よって SPD の寿命は 10^4 R 程度と推定される。
- (3) アナログ回路は約 10^5 R/h まで正常に動作したが、デジタル回路では 10^5 R/h でカウンターの一部が破壊した。今回の実験だけでは一概に言えないが、アナログ回路は放射線に比較的強く JT-60 では問題がないと思われる。
- (4) 石英ガラス、UV ガラス、硼硅酸ガラスの面板の照射試験において、石英ガラスは透過率がほとんど変化していなかったが、UV ガラスと硼硅酸ガラスは 300 nm 以下で透過率の低下がみられた。したがって、できるかぎり石英ガラスを使用することが望ましい。
- (5) ミラーおよび回折格子は 4×10^4 R までの範囲では何の異状も見い出せなかった。したがって、これらの機器は JT-60 において問題なく使用できる。
- (6) 光学ガラスの照射試験では、 γ 線による着色を少なくした、いわゆるノンブラウンガラスは、 10^{12} n/cm^2 程度の中性子に対しても着色しないことがわかった。

以上まとめると、PMT や SPD の光電変換素子は γ 線の影響を受けやすく、JT-60 における使用の際は十分な硬 X 線遮蔽が必要であるが、他の機材は、種類を選べば、JT-60 放射線環境程度では、ほぼ問題なく使用できると思われる。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、終始御支援していただいた苦米地頭大型トカマク開発部長、吉川允二大型トカマク開発部次長に深く感謝します。また有益な御意見、御指導をしていただいた鈴木康夫 JT-60 第 3 開発室室長、鷺野正光照射施設課課長に感謝します。さらに有意義なコメントをいただいた JT-60 第 3 開発室各位に感謝致します。

参考文献

- 1) Tanaka R., Tajima S. and Usami A.; Int. J. appl. Radiat. Isotopes 24 627 (1973)
- 2) Tanaka R., Tajima S. and Usami A.; Int. J. appl. Radiat. Isotopes 27 73 (1976)
- 3) Price W. J.; "Nuclear Radiation Detection", McGraw-Hill, New York, 1958
- 4) Baur J. F., Engholm B. A., Hacker M. P., Maya I., Miller P. H., Toffolo W. E., and Wojtowicz S. S.; "Radiation Hardening of Diagnostics for Fusion Reactors", GA-A 16614 UC-20
- 5) 石野 稔: "照射損傷" (1979), 東京大学出版会
- 6) Ricketts L. W.: Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment, Wiley-Interscience, New York, (1972)
- 7) 吉永 弘, "応用分光学ハンドブック", (1973), 朝倉書店
- 8) 志甫 諒, 応用物理 50, 960 (1981)