

JAERI-Tech

94-034



蛍光ガラス線量計の基本特性

1994年12月

石川達也*・村上博幸

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

This report is 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, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

蛍光ガラス線量計の基本特性

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

石川 達也*・村上 博幸

(1994年11月2日受理)

蛍光ガラス線量計は、窒素ガスレーザー紫外線励起法の開発により、きわめて安定性に優れた高精度の線量計となつたため、個人モニタリングや環境モニタリングにおける積算線量測定への応用が期待されている。今回同ガラス線量計の実用化に当たって必要となる基本的特性、即ち、線量直線性、エネルギー特性、方向特性、異種の放射線の混合照射時の測定性能、経時変化特性等を照射試験により調査した。この結果、今回調査したガラス線量計は、上記の項目のすべてに対して実用上十分な特性を有することが確認された。本報では今回の調査で得られたガラス線量計の基本的特性について報告し、今後同線量計を実際に使用する場合の基礎的データとする。

Basic Characteristics of Radiophotoluminescence Glass Dosimeter

Tatsuya ISHIKAWA* and Hiroyuki MURAKAMI

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

(Received November 2, 1994)

Radiophotoluminescence glass dosimeter(hereafter glass dosimeter) is well known as a passive type dosimeter which has such good characteristics as stability, uniformity, fading negligibility and others. However, some weak points, such as the problem on accuracy at low dose level due to predose and the requirement of washing before measurement, had been interrupting its wide-spreading in the field of operational radiation protection. Recently, new glass dosimeter measuring method using pulsed UV excitation was developed to solve the problems mentioned above. Then, the new type glass dosimeter is hoped to be widely used in the field of radiation protection dosimetry as well as film and thermoluminescence dosimeter.

In JAERI, some basic characteristics of the new glass dosimetry system were experimentally investigated for both individual and environmental monitoring purposes. This paper describes the characteristics obtained and also discusses their features in view of practical use of the glass dosimeter.

Keywords: Radiophotoluminescence(RPL), Glass Dosimeter, Personal Dosimeter, Dose Dependence Linearity, Energy Dependence, Angular Dependence, Build-up, Response, Characteristics

*Toshiba Glass Co.Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. ガラス線量計の構造	1
3. 特性調査内容および方法.....	2
3. 1 個人線量測定用ガラス線量計に関する特性調査項目	2
3. 2 環境線量測定用ガラス線量計に関する特性調査項目	3
3. 3 照射・試験方法	3
4. 結果および考察.....	4
4. 1 個人線量測定用ガラス線量計の特性	4
4. 2 環境線量測定用ガラス線量計の特性	10
4. 3 ガラス線量計とフィルムバッジの測定値の比較 (個人線量計相互比較の結果について)	12
5. 結言	13
謝辞	13
参考文献	14

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of Glass Dosimeter	1
3. Contents and Methods of Investigation	2
3.1 Testing Categories of Glass Dosimeter for Individual Monitoring	2
3.2 Testing Categories of Glass Dosimeter for Environmental Monitoring	3
3.3 Irradiations and Testing Methods	3
4. Results and Discussions	4
4.1 Characteristics of Glass Dosimeter for Individual Monitoring	4
4.2 Characteristics of Glass Dosimeter for Environmental Monitoring	10
4.3 Comparison between Glass Dosimeter and Film - Results of Personal Dosimeter Intercomparison -	12
5. Conclusions	13
Acknowledgements	13
References	14

1. まえがき

原子力関連技術の普及と共に、放射線の利用はますます多岐にわたっており、放射線作業者の数は著しく増大している。一方、ICRPの1990年勧告¹⁾等に見られるように放射線防護の面においてはより厳しい被ばく線量の管理が要求されるようになり、放射線業務従事者が着用する個人線量計や環境線量を監視する測定器もこれに対応してさらに高精度のものが望まれている。蛍光ガラス線量計（以下ガラス線量計）は、放射線照射によって生じた蛍光中心が読み取り操作を行っても消滅しないため、何回でも繰り返し測定ができるという特長がある。またその一方で熱ルミネッセンス線量計（TLD）と同じように高温で加熱すれば積算線量を消失させ再生利用することもできる。さらにガラスは、均質性に優れており、素子間の特性のはらつきが少なく、フェーディング（退色）も無視できるほど小さいという利点がある。このように、ガラス線量計は原理的にも長期積算型の線量計として優れた特性を持っている。

しかしながら、従来ガラス線量計は、プレドース（被ばく前発光）や測定前の洗浄の必要性などのため低線量域の測定精度に問題があり、個人線量計等として幅広く普及することはなかった。

近年、連続パルス発振のできる窒素ガスレーザーを利用した紫外線励起法の発展により、上記問題がすべて解決され、低線量域の高精度測定及び読み取りの自動化が可能となり、個人線量計やさらに低線量レベルの環境放射線監視用線量計としての利用が大いに期待されるようになっている。

線量計測課では、現行のフィルムバッジに代わる新しい個人線量計、あるいはまた環境モニタリング用の積算型線量計としてガラス線量計を利用する目的に各種特性調査を実施して、その実用化の可能性について検討した。本報ではこれらの調査により得られたガラス線量計の基本的特性について報告し、今後ガラス線量計を使用する場合に利用すべき基礎データとする。

2. ガラス線量計の構造

ガラス線量計は、米国のSchulmanら²⁾によって初めて紹介されたもので、ラジオフォトルミネッセンス現象（Radiophotoluminescence, RPL：ある種の銀活性化リン酸塩ガラスに放射線を照射し、その後紫外線によって刺激すると蛍光を発する現象）を利用した線量計である。このRPL現象の基本的メカニズムについてはすでに種々の論文等において解説されている^{3), 4)}。今回線量計測課において特性調査の対象としたのは、東芝硝子（株）製ガラス線量計（個人線量測定用：GD-400型；GD-402（ γ （X）、熱中性子線用）、GD-403（ γ （X）、 β 線用）、および環境線量測定用：SC-1）である。GD-400型のガラス素子は34x12x1.5mmのサイズで、素子IDとしての24ビットバイナリーコードの付いたステンレス製フレーム（カードと呼んでいる）に装填されており、これを4種類のエネルギー補償用フィルタが付けられた線量計カプセル（サイズ60x25x9mm）にセットして使用する。一方SC-1のガラス素子のサイズは16x16x1.5mmであり、

1. まえがき

原子力関連技術の普及と共に、放射線の利用はますます多岐にわたっており、放射線作業者の数は著しく増大している。一方、ICRPの1990年勧告¹⁾等に見られるように放射線防護の面においてはより厳しい被ばく線量の管理が要求されるようになり、放射線業務従事者が着用する個人線量計や環境線量を監視する測定器もこれに対応してさらに高精度のものが望まれている。蛍光ガラス線量計（以下ガラス線量計）は、放射線照射によって生じた蛍光中心が読み取り操作を行っても消滅しないため、何回でも繰り返し測定ができるという特長がある。またその一方で熱ルミネッセンス線量計（TLD）と同じように高温で加熱すれば積算線量を消失させ再生利用することもできる。さらにガラスは、均質性に優れており、素子間の特性のはらつきが少なく、フェーディング（退色）も無視できるほど小さいという利点がある。このように、ガラス線量計は原理的にも長期積算型の線量計として優れた特性を持っている。

しかしながら、従来ガラス線量計は、プレドース（被ばく前発光）や測定前の洗浄の必要性などのため低線量域の測定精度に問題があり、個人線量計等として幅広く普及することはなかった。

近年、連続パルス発振のできる窒素ガスレーザーを利用した紫外線励起法の発展により、上記問題がすべて解決され、低線量域の高精度測定及び読み取りの自動化が可能となり、個人線量計やさらに低線量レベルの環境放射線監視用線量計としての利用が大いに期待されるようになっている。

線量計測課では、現行のフィルムバッジに代わる新しい個人線量計、あるいはまた環境モニタリング用の積算型線量計としてガラス線量計を利用する目的に各種特性調査を実施して、その実用化の可能性について検討した。本報ではこれらの調査により得られたガラス線量計の基本的特性について報告し、今後ガラス線量計を使用する場合に利用すべき基礎データとする。

2. ガラス線量計の構造

ガラス線量計は、米国のSchulmanら²⁾によって初めて紹介されたもので、ラジオフォトルミネッセンス現象（Radiophotoluminescence, RPL：ある種の銀活性化リン酸塩ガラスに放射線を照射し、その後紫外線によって刺激すると蛍光を発する現象）を利用した線量計である。このRPL現象の基本的メカニズムについてはすでに種々の論文等において解説されている^{3),4)}。今回線量計測課において特性調査の対象としたのは、東芝硝子（株）製ガラス線量計（個人線量測定用：GD-400型；GD-402（γ(X), 熱中性子線用）、GD-403（X, β線用）、および環境線量測定用：SC-1）である。GD-400型のガラス素子は34x12x1.5mmのサイズで、素子IDとしての24ビットバイナリーコードの付いたステンレス製フレーム（カードと呼んでいる）に装填されており、これを4種類のエネルギー補償用フィルタが付けられた線量計カプセル（サイズ60x25x9mm）にセットして使用する。一方SC-1のガラス素子のサイズは16x16x1.5mmであり、

これもステンレス製の専用フレームに装填され、フィルタを付けたプラスチックカプセル(30x40x9mm)にセットして使用される。そのガラス素子、線量計の構造、フィルタ構成をそれぞれFig. 1-(a)、(b)⁵⁾およびTable 1、2に示す。

測定対象線種は、個人線量計用ガラス線量計(GD-400型)については γ (X)線、 β 線および熱中性子線、一方環境用ガラス線量計(SC-1)については γ (X)線とした。

ガラス線量計を測定するリーダーは、東芝硝子㈱製FGD-502型(GD-400型用)およびFGD-20(SC-1用)を使用した。FGD-502型では、一枚のガラス板の4箇所(Fig. 1(a)参照)について発光量(即ち電流値)をそれぞれ読み取り、あらかじめガラス線量計のタイプ毎に定められた線量計算方法(線量評価アルゴリズム)を用いてリーダー制御用のコンピュータ内で計算処理し、測定値が表示される。またFGD-20では、発光量の測定はガラス板全体に対して実施され、リーダー内のマイクロコンピュータで計算処理されてリーダー正面の表示窓に線量値が表示される。各リーダーにおいて表示される線量値は、基本的にリーダー内部の回路定数および単位表示を変更することによりどのような測定量に対しても対応することができる。今回の特性調査で使用したリーダーは、それぞれ個人線量当量(FGD-502:但し実際は周辺線量当量で表示単位は μSv)、空気吸収線量(FGD-20:表示単位 μGy)について表示されるもので、線量表示の基準となる放射線は ^{137}Cs の γ 線である。ガラス線量計用リーダーの構成ブロック図をFig. 2⁵⁾に示す。またそれぞれのリーダーの外観をPhoto 1、2に示す。

3. 特性調査内容および方法

3. 1 個人線量測定用ガラス線量計に関する特性調査項目

個人線量測定用ガラス線量計(GD-400型)の特性調査項目は以下の通りである。

1) 線量直線性(対象線種: γ 、 β 、熱中性子)

線量計のレスポンス(測定値/基準照射量)の線量依存度を示す特性であり、基本的に全測定領域にわたって一定であることが望まれる。

2) エネルギー特性(対象線種: γ 、X、 β)

放射線の線質に対する線量計のレスポンスを表す基本的特性であり、広いエネルギー領域にわたって変化が少ないことが望まれる。

3) 方向特性(対象線種: γ 、X、 β 、熱中性子)

放射線の入射方向に対する線量計のレスポンスの依存度を示す特性であり、方向変化に対する変動が少ないことが望ましい。

4) 異なった線種、線質の放射線による混合照射時の線量評価性能

異なる線質の放射線により照射された場合の測定性能を示す。

また上記の放射線測定性能に関する特性の他、線量計およびその測定系固有の特性として以下

これもステンレス製の専用フレームに装填され、フィルタを付けたプラスチックカプセル(30x40x9mm)にセットして使用される。そのガラス素子、線量計の構造、フィルタ構成をそれぞれFig. 1-(a)、(b)⁵⁾およびTable 1、2に示す。

測定対象線種は、個人線量計用ガラス線量計(GD-400型)については γ (X)線、 β 線および熱中性子線、一方環境用ガラス線量計(SC-1)については γ (X)線とした。

ガラス線量計を測定するリーダーは、東芝硝子㈱製FGD-502型(GD-400型用)およびFGD-20(SC-1用)を使用した。FGD-502型では、一枚のガラス板の4箇所(Fig. 1(a)参照)について発光量(即ち電流値)をそれぞれ読み取り、あらかじめガラス線量計のタイプ毎に定められた線量計算方法(線量評価アルゴリズム)を用いてリーダー制御用のコンピュータ内で計算処理し、測定値が表示される。またFGD-20では、発光量の測定はガラス板全体に対して実施され、リーダー内のマイクロコンピュータで計算処理されてリーダー正面の表示窓に線量値が表示される。各リーダーにおいて表示される線量値は、基本的にリーダー内部の回路定数および単位表示を変更することによりどのような測定量に対しても対応することができる。今回の特性調査で使用したリーダーは、それぞれ個人線量当量(FGD-502:但し実際は周辺線量当量で表示単位は μSv)、空気吸収線量(FGD-20:表示単位 μGy)について表示されるもので、線量表示の基準となる放射線は ^{137}Cs の γ 線である。ガラス線量計用リーダーの構成ブロック図をFig. 2⁵⁾に示す。またそれぞれのリーダーの外観をPhoto 1、2に示す。

3. 特性調査内容および方法

3. 1 個人線量測定用ガラス線量計に関する特性調査項目

個人線量測定用ガラス線量計(GD-400型)の特性調査項目は以下の通りである。

1) 線量直線性(対象線種: γ 、 β 、熱中性子)

線量計のレスポンス(測定値/基準照射量)の線量依存度を示す特性であり、基本的に全測定領域にわたって一定であることが望まれる。

2) エネルギー特性(対象線種: γ 、X、 β)

放射線の線質に対する線量計のレスポンスを表す基本的特性であり、広いエネルギー領域にわたって変化が少ないことが望まれる。

3) 方向特性(対象線種: γ 、X、 β 、熱中性子)

放射線の入射方向に対する線量計のレスポンスの依存度を示す特性であり、方向変化に対する変動が少ないことが望ましい。

4) 異なった線種、線質の放射線による混合照射時の線量評価性能

異なる線質の放射線により照射された場合の測定性能を示す。

また上記の放射線測定性能に関する特性の他、線量計およびその測定系固有の特性として以下

の項目についても調査した。

5) リーダーの再現性

同一素子を繰り返し測定した時の測定値の再現性を示すものでリーダーの基本的要件である。

6) 線量計素子間の感度のばらつきに関する調査

複数の素子に同一線量値を照射したときの各素子の測定値のばらつきの度合を示す。

7) 経時変化特性

照射終了後の時間の経過と共に測定値がどのように変化するかを示す性能である。

3. 2 環境線量測定用ガラス線量計に関する特性調査項目

環境線量測定用ガラス線量計（S C - 1）の特性調査項目は以下の通りである。なお調査対象線種はすべて光子のみ（ γ 線およびX線）である。

1) 線量直線性

2) エネルギー特性

3) 方向特性

また測定性能に関する特性以外の固有の特性として以下の項目についても調査した。

4) リーダーの再現性

5) 線量計素子間の感度のばらつきに関する調査

6) 経時変化特性

3. 3 照射・試験方法

上記の特性試験に係る照射は、熱中性子照射試験の一部を除き、日本原子力研究所東海研究所の放射線標準施設棟（Facility of Radiation Standard: F R S）の基準線源（熱中性子については黒鉛パイアル）およびX線照射装置を用いて実施した。熱中性子に対しては、試験研究炉J R R - 2のダブルモノクロメータ型中性子分光装置（D M N S装置）を用いた照射も実施した。

個人線量測定において測定目的とされる計測量（目的量）は、本来、国際放射線単位計測委員会（I C R U）の導入した個人線量当量 $H_p(d)$ ⁶⁾（単位 Sv；ここでdは、深さ 1 cm、3 mm、0.07 mmに対応）であるが、実際の照射においては、平行ビームによる單一方向照射を基本とし、照射の基準量として周辺線量当量 $H^*(d)$ ⁶⁾を用いた。国家標準機関である電子技術総合研究所（電総研）からの線量基準の移行は光子（ γ 、X線）については照射線量、中性子についてはフルエンスで実施されており、これから周辺線量当量への換算には国際放射線防護委員会（I C R P）が勧告した換算係数⁷⁾を利用した。なおX線については、その連続スペクトルを考慮した換算係数⁸⁾を用いた。

照射距離は、 γ （X）線については原則として2 m以上（ファントム全体がほぼ平行ビームで

照射されると見なせる距離)としたが、熱中性子線照射においては線量率が限定されるため、DMN S装置および黒鉛パイアル表面からそれぞれ104cm、40cmであった。

β 線の照射では、個人線量当量 $H_p(0.07)$ に代わる照射基準量は、外挿電離箱を用いた測定により決定された 7 mg/cm^2 透過時の組織吸収線量とし、 $H_p(0.07)$ への換算係数を1Sv/Gyとした。

照射時の校正基準点の位置は、一部の自由空气中照射に対しては線量計中心位置としたが、ファントム(ファントムは、J I S Z 4 3 3 1^⑨に規定されているものを使用した)付き照射に対しては、ファントム表面(線源に対向する面)中心位置とした。個人線量測定に係る方向特性調査においては、線量計を装着したファントムを校正基準点を含む鉛直線を軸として左右90°まで回転させて照射を行った。上下方向の特性試験では、線量計をファントム表面上で90°回転させて横向きに装着することにより実施した。照射時の線量計の装着状態をFig. 3-(a)、(b)に示す。但し、今回の調査では、目的量としての個人線量当量の角度による変化を考慮せず、方向特性はいずれも垂直入射時のレスポンスに対する割合(相対レスポンス)として求めた。

環境線量測定用ガラス線量計の照射も、FRSの基準線源およびX線照射装置を用い、自由空气中で実施した。照射の基準量は、現在の国内での一般環境中線量測定の現状を考慮し、空気吸収線量(単位 Gy: 照射線量から空気吸収線量への換算係数として、33.85Gy/(C/kg)(0.00873 Gy/R)を使用した)としたが、作業環境測定や個人線量測定への対応も考慮して、周辺線量当量(自由空气中照射)や個人線量当量(ファントム付き照射: 照射基準量は周辺線量当量を使用)に対する特性調査も一部実施した。方向特性については、個人線量測定用と同様正面垂直照射条件に対する相対レスポンスで求めた。

照射されたガラス線量計の測定は、個人線量測定用および環境線量測定用ガラス線量計いずれについても、照射直後の経時変化(ビルドアップ: 後述)を考慮し、原則として照射終了後24±4時間に実施した。

4. 結果および考察

4.1 個人線量測定用ガラス線量計の特性

1) 線量直線性

個人線量測定用ガラス線量計(GD-402およびGD-403)の線量直線性の調査試験結果をFig. 4(γ 線)、Fig. 5(β 線)、Fig. 6(熱中性子線)に示す。グラフはFig. 6を除き、1mSvを基準とした相対レスポンスで表示した。Fig. 4から明らかなように、 γ 線(^{60}Co)に対する線量直線性は、 $100\text{ }\mu\text{Sv}$ (0.1mSv)から1Svの範囲の線量値に対して±5%以内であり、広い線量範囲内で実用上十分な性能を有することが判った。 β 線に対しては $300\text{ }\mu\text{Sv}$ から 100 mSv の範囲で同様に±5%以内という結果が得られたが、低線量値($100\text{ }\mu\text{Sv}$)に対してはやや大きな値(12%)となった(Fig. 5)。この原因としては、低線量域でのガラス線量計による β 線量評価上の誤差の他、短い照射時間に起因する基準照射量の値の精度の影響が考えられる。熱中性

照射されると見なせる距離)としたが、熱中性子線照射においては線量率が限定されるため、DMNS装置および黒鉛パイアル表面からそれぞれ104cm、40cmであった。

β 線の照射では、個人線量当量 $H_p(0.07)$ に代わる照射基準量は、外挿電離箱を用いた測定により決定された $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 透過時の組織吸収線量とし、 $H_p(0.07)$ への換算係数を1Sv/Gyとした。

照射時の校正基準点の位置は、一部の自由空气中照射に対しては線量計中心位置としたが、ファントム(ファントムは、JIS Z 4331^⑨に規定されているものを使用した)付き照射に対しては、ファントム表面(線源に対向する面)中心位置とした。個人線量測定に係る方向特性調査においては、線量計を装着したファントムを校正基準点を含む鉛直線を軸として左右90°まで回転させて照射を行った。上下方向の特性試験では、線量計をファントム表面上で90°回転させて横向きに装着することにより実施した。照射時の線量計の装着状態をFig. 3-(a)、(b)に示す。但し、今回の調査では、目的量としての個人線量当量の角度による変化を考慮せず、方向特性はいずれも垂直入射時のレスポンスに対する割合(相対レスポンス)として求めた。

環境線量測定用ガラス線量計の照射も、FRSの基準線源およびX線照射装置を用い、自由空气中で実施した。照射の基準量は、現在の国内での一般環境中線量測定の現状を考慮し、空気吸収線量(単位 Gy: 照射線量から空気吸収線量への換算係数として、33.85Gy/(C/kg)(0.00873 Gy/R)を使用した)としたが、作業環境測定や個人線量測定への対応も考慮して、周辺線量当量(自由空气中照射)や個人線量当量(ファントム付き照射: 照射基準量は周辺線量当量を使用)に対する特性調査も一部実施した。方向特性については、個人線量測定用と同様正面垂直照射条件に対する相対レスポンスで求めた。

照射されたガラス線量計の測定は、個人線量測定用および環境線量測定用ガラス線量計いずれについても、照射直後の経時変化(ビルドアップ: 後述)を考慮し、原則として照射終了後24±4時間に実施した。

4. 結果および考察

4.1 個人線量測定用ガラス線量計の特性

1) 線量直線性

個人線量測定用ガラス線量計(GD-402およびGD-403)の線量直線性の調査試験結果をFig. 4(γ 線)、Fig. 5(β 線)、Fig. 6(熱中性子線)に示す。グラフはFig. 6を除き、1mSvを基準とした相対レスポンスで表示した。Fig. 4から明らかなように、 γ 線(^{60}Co)に対する線量直線性は、 $100\mu\text{Sv}$ (0.1mSv)から1Svの範囲の線量値に対して±5%以内であり、広い線量範囲内で実用上十分な性能を有することが判った。 β 線に対しては $300\mu\text{Sv}$ から 100mSv の範囲で同様に±5%以内という結果が得られたが、低線量値($100\mu\text{Sv}$)に対してはやや大きな値(12%)となった(Fig. 5)。この原因としては、低線量域でのガラス線量計による β 線量評価上の誤差の他、短い照射時間に起因する基準照射量の値の精度の影響が考えられる。熱中性

子線についてはDMNS装置を用いた照射によるもので線量範囲が γ 線や β 線に比べて狭いこともあり、きわめて良好な特性が得られた(Fig. 6)。しかしながら、その測定値は金箔の絶対測定から求められた熱中性子線量値よりもやや低めの値を示した。これは、現在採用されている線量評価アルゴリズムが放射線標準施設棟の黒鉛パイプの照射により策定されており、この実験を行ったDMNS装置とは照射幾何条件や中性子スペクトル等が大きく異なることによるものと考えられる。

全体として、本試験の範囲での個人線量測定用ガラス線量計GD-400型の線量直線性は良好であり、実用上十分な特性であることが示された。

2) エネルギー特性

ガラス線量計GD-403のエネルギー特性は、 γ (X)線および β 線について調査した。線量計のレスポンスは、各測定対象量毎、および照射条件毎に異なるため、同特性も対象量および照射条件毎に求めた。ガラス線量計GD-403の個人線量当量 $H_p(10)$ に対するレスポンスのエネルギー特性調査結果をFig. 7(X線の線質指標 $Q_I = 0.8$ の場合)およびFig. 8(同 $Q_I = 0.6$ の場合)に示す。またさらに、20keV未満および6360keV(^{16}N)に対するレスポンスをTable 3に示す。Fig. 7、8により、30keVから1250keV(^{60}Co)の光子エネルギー範囲において、個人線量当量レスポンスは±10%以内と良好であり、X線のスペクトル変化の影響についても、線質指標の僅かな違い程度ではほとんどレスポンスは変わらないことが判った。しかし一方、Table 3により30keV以下の光子エネルギー範囲ではレスポンスは低下し、10keV以下ではほとんど感度を有しなくなることが判った。また逆に ^{16}N の γ 線の高エネルギー域では、金属フィルタの影響により過大レスポンスとなることが明らかとなった。

個人線量測定用ガラス線量計GD-403を作業環境線量測定等特殊な用途に用いた場合の性能を調査するため、同線量計を自由空气中で照射し、周辺線量当量および照射線量を対象量としたエネルギー特性を求めた。その結果をFig. 9およびFig. 10に示す。周辺線量当量に対するレスポンスは、個人線量当量の場合と比べてファントムによる散乱の寄与がない分だけ(平均30%程度)低下している。しかし、実際の測定においては、平均校正定数1.35(Sv/Sv)を用いると±20%以内の周辺線量当量エネルギー特性となり(図中破線で示す)、実用上十分な測定性能が得られることが判る。また一方、照射線量に対するレスポンスにおいても 1.0×10^{-1} (R/mSv)という校正定数により±20%以内の良好なエネルギー特性が得られることが判った。以上のことからガラス線量計GD-403は、作業環境測定等の用途にも校正定数を変えるだけで使用でき、しかも実用上十分な正確さを有していることが判った。

Fig. 11に β 線に対するガラス線量計GD-403のエネルギー特性(対象量 $H_p(0.07)$)を示す。 β 線のエネルギーは、国際標準機関(ISO)の推奨する残留最大エネルギー¹⁰⁾を採用している。同図からわかるように、ガラス線量計の β 線に対するエネルギー特性はきわめて良好で、²⁰⁴Tlから⁹⁰Yまでのエネルギー範囲の β 線に対して、十分な測定性能を有していることがわかった。しかしながら¹⁴⁷Pmについては誤差も大きく、特性調査に使用した線源と現実の線源との態様の違い等を考慮すると実際の作業場において¹⁴⁷Pmの外部被ばく線量を測定評価することは困難であると思われる。

3) 方向特性

Fig. 12、13、14にガラス線量計GD-403の γ 線(^{137}Cs , ^{60}Co)に対する方向依存性(垂直入射方向を基準(=1)とした相対レスポンス)を示す。水平方向の入射角度変化に対しでは、この線量計は左右90°までの範囲において良好な(約±10%以内)方向特性を有することがわかった。ただ、Fig. 12、13から、 ^{137}Cs γ 線に対しては入射角度が大きくなるにつれてレスポンスが減少するのに対し、 ^{60}Co の場合は逆にやや増加する傾向がみられる。この全体の傾向の違いは基本的に両 γ 線のフィルタ透過力の差および線量評価アルゴリズムに起因するものと考えられる。但し、元来両 γ 線に対する感度は正面からの垂直照射に対しても異なっており(Fig. 7参照)、両グラフは共にその点において規格化されているため、実際には大きな入射角度における両者の絶対値に大きな差はない。なお、線量計の方向特性が左右あるいは上下に対称となることが十分明らかな場合には、実際の照射実験を省略し、各方向特性の図においては破線で表した。

垂直方向の角度変化(上下90°まで)は、 ^{137}Cs γ 線に対してのみ求めた(Fig. 14)が、水平方向の変化と大きな違いではなく、入射角度が大きくなり被照射ガラスの立体角が減少するのに伴ってレスポンスが減少するものと考えられる。但し、減少の割合は10%程度であり、実用上の問題はほとんどないといえる。

次にFig. 15、16に実効エネルギー80keVのX線(QI=0.8)に対する方向依存性を示す。一般的な傾向としては、 γ 線の場合に述べたように入射角度が大きくなるにつれてレスポンスが減少し、その減少割合も γ 線の場合に比べて大きくなっているべきであると言える。しかしながら、下方75°からの照射に対しては特異的に感度が上昇するという結果が得られた。これは β 線用窓も含めたフィルタの作用と線量評価アルゴリズム(垂直照射時のレスポンスにより策定されている)の相乗的効果によって出現したものと考えられるが、実用上の影響は少ない。

β 線(^{90}Sr - ^{90}Y)に対する方向依存性をFig. 17-(a), (b)に示す。 β 線の場合は透過力が弱いため、入射角度が大きくなるにつれて入射窓周辺物質が入射窓を次第に遮るようになるため、ガラス素子に対する立体角は小さくなる。このため水平方向、垂直方向共に大きな方向依存性の存在が予想されるが、上記のFig. 17の結果もこの予想通りのものとなった。このため、 β 線の照射に対して実用上十分な正確さ(係数1.5のファクタ以内とする¹¹⁾)で測定可能な範囲は、上下左右ともおよそ30°以内であることがわかった。

熱中性子線に対するガラス線量計GD-402の方向特性の調査は、すでに述べたように2種類の線源を用いて実施した。このうちJRR-2のDMNS装置を用いた照射では、同装置から得られる熱中性子ビームが平行性に優れている(但し、照射野は小さい: 約7cm x 5cm)ため、入射角度の違いによる立体角の変化をよく反映した特性が得られた(Fig. 18)。理想的照射条件、すなわち、ファントム全体に平行ビームが当たる場合には、ファントムによる散乱の影響がさらに大きく加わり、入射角度が大きい場合のレスポンスに改善が見込まれることから、実用的には上下左右45°程度まで十分な性能を有することが予想される。一方、放射線標準施設棟の黒鉛パイプを用いた照射(黒鉛パイプ照射面のサイズ: 150cm x 116cm; 照射距離は照射面より40cm)により得られたガラス線量計GD-402の方向依存性をFig. 19に示す。この図によれば、上下左右60°まで実用上十分な特性が得られているが、線源の方が被照射対象物に対して大きく、また照射面の大きさに対して照射距離が短いというきわめて特殊な幾何条件であり、このような照射状

況は実際の作業者等の被ばくを考慮すると必ずしも現実的でないことから、同図における大きな入射角度（～60°以上）領域での性能は参考データとしての取扱いが適当であろう。なお、ガラス線量計に限らず、中性子線測定器の校正に関しては適切な校正用照射場の確保が必要であり、利用可能なビームの大きさ、フルエンス等について今後十分検討すべきであろう。

4) 異なった線種、線質の放射線による混合照射時の線量評価性能

放射線作業者は、種々の放射線による複合的な被ばくを受ける可能性がある。またX線等では、その使用目的あるいは使用方法により線質（すなわちスペクトル）が大きく異なることが予想される。従って線量計の実用化を図るに当たっては、すでに求めたような単色（あるいはできるだけ単色に近い）スペクトルの放射線に対する特性以外に、異種の放射線の混合あるいは異なった線質の放射線が混在した場合のレスポンスの特性を調査しておく必要がある。このため今回、 γ 線(^{137}Cs)、X線(実効エネルギー24.1、48.6、80.0、119keV；いずれもQI=0.8)および β 線(^{204}Tl 、 ^{90}Sr - ^{90}Y)を組合せと線量比を変えて照射することにより、これらの放射線の混合照射時の線量評価性能を調べた。今回の混合照射時の線量評価性能の調査項目、調査対象とした放射線の組合せの種類をTable 4に示す。Table 4の各項目の調査の結果を以下に示す。

- ① ^{137}Cs γ 線とX線の混合照射試験では、Table 4の全ての調査項目に対して、 γ (X)線量評価値は±10%以内(24.1keV X線を除くと±5%程度)となった。Fig. 20にその一例(X線の実効エネルギー80.0keVの場合)を示す。
- ②線質の異なる二つのX線(実効エネルギー48.6keVおよび80keV)の照射試験では、Table 4中の混在比に対して最大誤差は5.1%で単独の場合の誤差と殆ど変わらない結果が得られた(Fig. 21)。
- ③ ^{137}Cs γ 線と β 線の混合照射時の γ 線量評価では、 ^{204}Tl の場合より ^{90}Sr - ^{90}Y の方が影響が大きく、 β 線量値が ^{137}Cs γ 線量の15倍に達すると誤差が大(約15%)となり、20倍では γ 線量評価不能となった。次に β 線量の評価性能をFig. 22、23に示す。同図より、 ^{90}Sr - ^{90}Y の β 線量の評価では、 ^{137}Cs の γ 線量が β 線量の7倍程度までは誤差も小さいが、8倍以上になると誤差が増大する(10倍では評価不能)ことがわかった。また ^{204}Tl の β 線量については、 ^{137}Cs の γ 線量が β 線量の2倍に達すると誤差が大きくなり、5倍以上では評価不能となることがわかった。
- ④X線同士の混合照射時の測定性能調査は、Table 4に示されているようにエネルギー依存性の違いの大きい実効エネルギー48.6keVと同80keVのX線に対して実施した。その結果同表の混合比の範囲では線量評価に影響はなく、正確な(最大誤差5.6%)評価ができることがわかった。
- ⑤ β 線とX線の混合照射時の性能調査は、それぞれ2種類の線質(β : ^{204}Tl と ^{90}Sr - ^{90}Y ；X:実効エネルギー48.6keVと同80keV)に対して実施した。この結果X線の線量評価性能に対する β 線の影響はTable 4の線量比の範囲では殆ど無視できるが、逆に β 線量評価性能に対する低エネルギーX線の影響は大きく、 ^{90}Sr - ^{90}Y の β 線量に対するX線量の比が48.6keVでは2倍(^{204}Tl では1倍)、80keVのX線では3倍に達すると評価不能となった(Fig. 24)。

⑥エネルギーの異なる β 線同士の照射では、 $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ に対する ^{204}Tl の β 線量値が増加するにつれ若干評価誤差が増大する（最大約14%）が、今回の試験の範囲では線量評価上の影響は小さいことがわかった（Fig. 25）。

以上の結果、異なった線種、線質の放射線の混合照射時において極端な線質や線量の違いがある場合には、ガラス線量計による線量測定評価に支障が生じる可能性があることがわかった。実用上は特に低エネルギーX線と β 線の混合照射の場合に注意する必要があると思われる。これはこのタイプのガラス線量計の紫外線刺激および集光の仕組み、即ち β 線や低エネルギーX線に対しては集光量が少ない（Fig. 26¹²⁾参照）ための影響と考えられ、このことから両者を弁別する性能は、低エネルギー光子に対して極端に高感度となるフィルム等に比べやや劣る可能性があるが、原研等での放射線作業者の被ばくの現状等を考慮すると実際上の問題はないと思われる。

5) リーダーの再現性および線量計素子間の感度のばらつきに関する調査

Fig. 27にガラス線量計リーダーの再現性の調査結果を、またFig. 28に線量計間のばらつきに関する調査結果を示す。この両特性は互いに密接に関連している。リーダーの再現性（正確にはリーダー+素子の測定系の再現性）についての調査は、ある素子を繰り返し測定したときの測定値の変動の度合（変動係数）を素子に与えられた線量毎に示したものである。ここで、変動係数Cは以下の式で表される。

$$C = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times 100 \quad (\%) \quad \dots (1)$$

x_i : i回目の測定値、 \bar{x} : 平均値、 n : 測定の回数

Fig. 27は ^{60}Co の γ 線を線量を変えて照射し、それぞれについて10回ずつ測定した時の測定値の変動係数を示したものである。ガラス線量計GD-400型は0.05mSv以上の線量値に対しては5%未満、また0.2mSv以上では1%未満という優れた再現性を有することがわかった。ここで、同図のパルス数とは1回の測定当りの紫外線パルスの発光に基づく測定操作（読み取り）の数を表しており、1回当りの測定値はこのパルス数分だけの読み取り値の平均値として求められる。従って、今回の調査に利用したパルス数20と50については統計的精度は当然50パルスの方が良いと考えられ、Fig. 27もその予想通りの結果となっている。

Fig. 28は、素子10個（同一製造単位のものを使用）に同一線量値の ^{137}Cs γ 線を照射してそれぞれ測定したときの分散（式（1）と同じ）を図示したものである。これにより、低線量域（0.1mSv以下）では数%程度の個体のばらつきが見られることがわかった。きわめて精密な測定が要求される場合には個々のガラス素子毎に独自の校正定数を定めて対応することも可能であるが、

同じ低線量域におけるリーダーの再現性 (Fig. 27 参照) の限度を考えるとそれほど大きな効果は期待できない。むしろ線量値を上げて精度の向上を図るべきであろう。

以上求められたようなばらつきがこのガラス線量計の測定系の精度の限界だと考えられるが、現実的には個人モニタリングにおいても環境モニタリングにおいても上記のような低いレベルの線量値の精密測定を線量計とリーダーが分離される方式の測定器で実施することは稀であり、実用上の問題はないであろう。

6) 経時変化特性

ガラス線量計 GD-403 の測定値が、照射終了後時間の経過と共にどの様に変化するかということ（経時変化特性）を調査した結果を Fig. 29 に示す。グラフは照射後 24 時間を基準とした線量計の測定値の経時変化を線量計が保管される場所の温度をパラメータとして表している。温度値 (0 °C, 20 °C, 40 °C) は年間を通しての気温の変動の幅にはほぼ対応している。測定は、測定時の温度依存性の影響を除くため、30 分間室温中で放置してから実施し、測定終了後直ちにまたもとの雰囲気中に戻すという方法で、最大 90 日までの変化の様子を調査した。同図より測定値の経時変化は、後で議論するビルドアップ現象を除いてきわめて少なく、特にフェーディングはほぼ無視できることがわかった。放置雰囲気中温度に対する依存性では、温度が低いほど初期（照射後 2 週間程度まで）の変化が大きく、レスポンスが上昇傾向を続けることが明かとなった。ガラス線量計は蛍光中心の生成が照射直後に完成されるのではなく、比較的長い時間をかけて完成される（ビルドアップ）ことがわかっている¹³⁾。今回の測定ではほぼ定期に達するとされる照射後 24 時間後を基準としたが、実際には Fig. 29 に示すようにそれ以後もさらに蛍光中心の生成は進行し、しかもその生成速度は放置雰囲気中の温度に依存する、すなわち高温の方が蛍光中心の生成速度が速いことが明かとなった。照射後ガラス線量計を加熱してやると早く安定状態に達し、精度の良い測定ができる（加熱処理）ことはよく知られているが、Fig. 29 に見られるように高温状態を維持し続けた場合、レスポンスは一旦最大となった後わずかではあるが下降傾向に転ずることがわかった（40 °C 11 週間で約 3 % 程度、但し 0 °C および 20 °C では殆ど見られない）。このため現実的な使用状況下においてレスポンスの変化がみられるか否かを明らかにするため、室温での経時変化を調査した。その結果、Fig. 30 に示すようにガラス線量計のレスポンスはきわめて安定で、1 年間にわたって殆ど変化せず、減少傾向も見られないことが明かとなった。これらの結果、ガラス線量計の経時変化については、実用上全く問題のないことが判明した。

今回得られた経時変化の特性と前項で述べたばらつきの程度を考慮すると、当該ガラス線量計の検出限界線量を推定できる。1 年間放置後のガラス線量計 GD-403 のバックグラウンド測定値（平均値、約 640 μSv ）のばらつき（標準偏差の 3 倍とする）から推定した検出限界値は数十 μSv であり、このことから、1 年間の連続積算使用に対しても 0.1 mSv という検出限界線量が十分可能であると考えられる。

ところでガラス線量計照射後 1 時間後の測定値と基準としている 24 時間後の測定値の比を Table 5 に示す。同表から明らかなように、照射後短時間の測定では、蛍光中心の生成がまだ十分でなくビルドアップが初期の段階であるため、測定値は過小評価となる。しかし現実の個人モニタリング等においては、事故時など緊急にしかもごく短時間内に線量測定をする必要がある場合が考

えられる。このような場合には、すでに述べた加熱処理（例えば70°Cで1時間とか100°Cで30分）によりビルドアップを促進させ、安定させてから測定を行うか、あるいはTable 5の比の逆数を特別の校正定数として使用する方法をとるなどにより対応することができる。但し、加熱処理を行った場合、それ以降の諸特性（特に経時変化）が明かでないため、再生処理（通常400°C、1時間加熱による）を施さずに継続して使用するためにはこれらについての調査確認が必要である。

以上のような特性調査結果から、個人線量測定用ガラス線量計GD-400型は優れた特性を有しており、実用上十分な性能を備えていることが明かとなった。

4.2 環境線量測定用ガラス線量計の特性

1) 線量直線性

環境線量測定用ガラス線量計SC-1の線量直線性の調査は、 ^{60}Co γ 線を0.0873mGy(10mR)から523.8mGy(60R)までの線量値で照射することにより実施した。その結果をFig. 3 1（但し、1mGyを基準とする相対レスポンス。また、グラフ上では523.8mGyに対する点は省略した。）に示す。同図より、ガラス線量計SC-1は上記の線量範囲において、標準偏差5%以内の優れた直線性を有していることがわかった。しかし本実験の結果によれば、そのレスポンスにきわめてわずかながら線量依存性がある（線量が高いほど高いレスポンスを示す傾向がある）可能性が示唆されている。従って、高精度の測定を実施する場合には線量レベル毎に校正定数を定める必要があるかも知れない。

2) エネルギー特性

ガラス線量計SC-1の光子エネルギー依存性は、以下のような四種類の測定量に対して求めた。

- * 空気吸収線量
- * 照射線量
- * 周辺線量当量 $H^*(10)$
- * 個人線量当量 $H_p(10)$ （但し、照射基準量は $H^*(10)$ を用いた。）

このうち、個人線量当量についてはファントムを用いて照射を行った。求められたエネルギー特性をFig. 3 2-3 5にそれぞれ示す。

ガラス線量計SC-1用リーダーFGD-20は、 ^{137}Cs の γ 線の空気吸収線量に対して校正されており、Fig. 3 2に示すように、空気吸収線量に対するエネルギー特性は、校正定数を1として30keV以上で $\pm 20\%$ 以内、20keV以上では $\pm 30\%$ 以内という結果となった。次に照射線量に対するレスポンス（単位：mGy/R）は、空気吸収線量に対するレスポンス（単位：mGy/mGy）に比べて全ての点で8.73倍だけ増加するが、その平均値から求めた平均校正定数（ 1.10×10^{-1} R/mGy）を用いると30keV以上のエネルギー範囲において $\pm 15\%$ 以内のエネルギー特性（Fig. 3 3中破線で示す）が得られた。

自由空气中での照射により求めたガラス線量計 S C - 1 の周辺線量当量レスポンスのエネルギー依存性を Fig. 3 4 に示す。各エネルギーに対するレスポンスの平均値から校正定数を定める (1. 3 5 Sv/Gy : 図中破線で示すグラフとなる) と、2 4. 1 keV から 1 2 5 0 keV (^{60}Co) のエネルギー範囲で $\pm 1 7 \%$ 以内の測定が可能となることがわかった。なお、Fig. 3 2、3 3、3 4 の照射では、X 線の線質指標 Q I を 0. 8 としたが、Q I = 0. 6 の場合についてもエネルギー特性を調査した結果、空気吸収線量では 3 0 keV 以上について $\pm 1 2 \%$ 以内、照射線量に対しては平均校正定数を使用して同 $\pm 1 3 \%$ 程度と Q I = 0. 8 の場合よりもやや改善されることがわかった。一方、Q I = 0. 6 に対する周辺線量当量レスポンスは極低エネルギー領域 (4 0 keV 未満) で急激に上昇し、レスポンスの平均値を校正定数とした場合この領域では過大評価となることがわかった。但し、4 0 keV 以上では $\pm 1 5 \%$ 以内の良好な特性となる。

ガラス線量計 S C - 1 の個人線量当量に対するレスポンスのエネルギー特性はきわめて良好であり、Fig. 3 5 に示すように 2 4. 1 keV 以上の範囲において、レスポンスの平均値から求めた校正定数 (1. 0 8 Sv/Gy) を用いると $\pm 1 0 \%$ 以内の変動幅内に入った。従って、同線量計は光子 (γ 線、X 線) に対してはきわめて優れた個人線量測定用線量計であり、もし個人モニタリング用として優先的に使用する場合には上述の校正定数值に合うようにリーダーの方を校正しておけば直接的に個人線量当量値を得ることができる。

3) 方向特性

ガラス線量計 S C - 1 のレスポンスの光子に対する方向依存性は、 $^{137}\text{Cs} \gamma$ 線および 8 0 keV X 線 (Q I = 0. 8) を用いて調査した。照射はいずれも自由空气中で線量計中心を通る直線を軸として回転させる (上下左右 180°まで) ことにより実施した。その結果を Fig. 3 6 - 3 9 に示す。同図より明らかなように、S C - 1 は、側面あるいは真上、真下 (上下 90°) からの照射を受ける場合を除き、 $^{137}\text{Cs} \gamma$ 線に対して良好な方向特性を有している。しかし、8 0 keV X 線に対する方向依存性は大きく、入射角度が大きくなるにつれてレスポンスは急激に減少することがわかった (Fig. 3 8、3 9)。これは、Fig. 1 - (b) に示すエネルギー補償用フィルタ (S n : 0. 75 mm 厚) およびガラス支持枠による遮蔽の影響で、入射角度が大きくなるにつれてレスポンスが減少したためと考えられる。また水平 (左右) 方向のレスポンスの変化はほぼ対称形となるが、上下方向の角度変化では、下方からの照射に対して感度が再び上昇している。これはエネルギー補償用フィルタの大きさと配置の影響、すなわちフィルタで覆われていない部分 (Fig. 1 - (b) 参照) が素子下方に 7 mm 幅ほどあり、この部分を通しての X 線の入射に起因するレスポンスの上昇によるものと考えられる。

以上、ガラス線量計 S C - 1 は低エネルギー光子のみで照射される場合を除き、良好な方向特性を有していると見なすことができる。

4) 線量計素子間の感度のばらつきおよびリーダーの再現性に関する調査

環境線量測定用ガラス線量計 S C - 1 についても、個人線量測定用ガラス線量計 G D - 4 0 0 型の場合と同様に線量計素子間の感度のばらつきおよびリーダーの再現性に関する調査を実施した。線量計の感度のばらつきについては、1 0 個の線量計に対して $^{137}\text{Cs} \gamma$ 線を照射することにより実

施した結果、環境での測定レベルの線量（約 $200 \mu\text{Gy}$ ）に対し、変動係数は 1.95% と良好であった。但しこの値は、同一製造単位の素子に対する数値であり、製造単位が異なる場合には、最大±数%程度まで変動係数が増大することがわかっている¹⁴⁾。このため、個人線量当量の場合と同様、高精度の測定が必要な際には製造単位毎の補正を行なうかあるいは、個々の線量計独自の校正定数を使用することが望まれる。また上記の変動係数の数値には、次に述べるリーダーの再現性も含まれている。

ガラス線量計リーダーの再現性（同一素子を10回測定したときの測定値の変動係数）は、線量を $20 \mu\text{Gy}$ から 100mGy まで変えて照射した線量計を用いて調査した。Fig. 4 0にその結果を示す。この図から、 0.1mGy 以上の線量値に対する変動係数は 1% 以下であり、きわめて良好な再現性を有していることがわかった。

5) 経時変化特性

環境線量測定用ガラス線量計SC-1の経時変化特性を放置環境温度を変えて調査した結果をFig. 4 1に示す。但し試験条件は、個人線量測定用線量計の場合と同様である。同図より、放置温度 40°C ではわずかながらレスポンスが低下する傾向がみられるが、一般にビルドアップ後はきわめて安定していることがわかる。さらに精密な測定が必要な場合や、照射後極く短時間内に測定をする場合などにおいては、すでに述べた個人線量測定用ガラス線量計に対する場合と同様、加熱処理をしてから測定を実施することが必要となる。

4.3 ガラス線量計とフィルムバッジの測定値の比較

(個人線量計相互比較の結果について)

米国オークリッジ国立研究所(ORNL)では1974年以来ほぼ毎年個人線量計相互比較を実施しており、原研線量計測課も1989年(第14回)より参加してきた。1991年(第16回)までは、原研IV型フィルムバッジのみで参加してきたが、1992年(第17回)は同フィルムバッジにガラス線量計(GD-403)も加えた2種の線量計により参加した。この相互比較のプログラムにおいて得られた両線量計の測定値の比較結果を報告する。測定線種は、フィルムバッジについては γ 線、 β 線、中性子線の3種であるが、ガラス線量計の測定可能線種は γ 線、 β 線のみであるため、ここでは中性子線の線量については省略する。

Table 6に第17回ORNL個人線量計相互比較における原研IV型フィルムバッジとガラス線量計(GD-403)による γ 線、 β 線の $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ 測定評価結果を示す。ここで項目1から5はすべて中性子線源のみによる照射であり、 γ 線線量すなわち $H_p(10)$ はこれらの中性子源に付随する γ 線の寄与を表している。一方、項目6、7は ^{137}Cs γ 線および $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ β 線による照射であり、 $H_p(10)$ は ^{137}Cs γ 線の線量、 $H_p(0.07)$ は ^{137}Cs γ 線および $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ β 線の線量である。なお、 ^{137}Cs γ 線については $H_p(10) \approx H_p(0.07)$ とした。また各項目毎に使用された線量計は3個である。

Table 6よりガラス線量計には低線量域における安定性と精度が十分に備わっていることがわ

かる。項目6の $H_p(10)$ の結果でわかるように、2 mSv程度の γ 線に対するフィルム、ガラス線量計の性能はほとんど変わらないが、原研IV型フィルムバッジについては項目1から5のような低線量域での高精度測定には無理があり、このような条件ではガラス線量計の測定性能が優れていることが明かとなった。但し項目5については基準線量値に比べてかなり低い測定値となっており、この原因としてポリエチレン減速 ^{252}Cf 線源からの γ 線のエネルギー分布の影響等が上げられると思われるが、実質的検討は現段階では行っていない。一方、 β 線量評価については原研IV型フィルムバッジを用いると $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ β 線に対してかなりの過大評価になることは過去に指摘されており¹⁵⁾、その通りの結果が得られている。ガラス線量計の β 線量評価結果は概ね良好であるが、一点だけ低い評価値となっている。この原因としては照射時の線量計の傾き等の影響が考えられるが、これについても詳細な検討は行っていない。従って今後も同プログラムに継続して参加し、上記の原因を解明することが望まれる。

5. 結言

本特性調査の結果、ガラス線量計は個人モニタリングや環境モニタリング用線量計として優れた基本特性を有していることが明かとなった。今後、現在広く利用されているフィルム線量計や熱ルミネッセンス線量計(TLD)に代わる基本的な線量計として使用されることが期待される。またガラス線量計は再現性や安定性に優れ、素子間のばらつきや経時変化もきわめて小さいことからモニタリング用としてだけでなく、基準線量値の相互比較など基準校正技術の分野での利用も実用化されつつある。原研もこのガラス線量計に関する実用化のための検討を引き続き継続することが望まれる。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、技術的助言、御指導を頂いた日本原子力研究所保健物理部南賢太郎次長に感謝致します。また、JRR-2のDMNS装置の利用に当たって御協力頂いた同材料研究部中性子散乱研究室皆川宣明氏に感謝致します。

かる。項目6の $H_p(10)$ の結果でわかるように、2mSv程度の γ 線に対するフィルム、ガラス線量計の性能はほとんど変わらないが、原研IV型フィルムバッジについては項目1から5のような低線量域での高精度測定には無理があり、このような条件ではガラス線量計の測定性能が優れていることが明かとなった。但し項目5については基準線量値に比べてかなり低い測定値となっており、この原因としてポリエチレン減速 ^{252}Cf 線源からの γ 線のエネルギー分布の影響等が上げられると思われるが、実質的検討は現段階では行っていない。一方、 β 線量評価については原研IV型フィルムバッジを用いると $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ β 線に対してかなりの過大評価になることは過去に指摘されており¹⁵⁾、その通りの結果が得られている。ガラス線量計の β 線量評価結果は概ね良好であるが、一点だけ低い評価値となっている。この原因としては照射時の線量計の傾き等の影響が考えられるが、これについても詳細な検討は行っていない。従って今後も同プログラムに継続して参加し、上記の原因を解明することが望まれる。

5. 結言

本特性調査の結果、ガラス線量計は個人モニタリングや環境モニタリング用線量計として優れた基本特性を有していることが明かとなった。今後、現在広く利用されているフィルム線量計や熱ルミネッセンス線量計(TLD)に代わる基本的な線量計として使用されることが期待される。またガラス線量計は再現性や安定性に優れ、素子間のばらつきや経時変化もきわめて小さいことからモニタリング用としてだけでなく、基準線量値の相互比較など基準校正技術の分野での利用も実用化されつつある。原研もこのガラス線量計に関する実用化のための検討を引き続き継続することが望まれる。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、技術的助言、御指導を頂いた日本原子力研究所保健物理部南賢太郎次長に感謝致します。また、JRR-2のDMNS装置の利用に当たって御協力頂いた同材料研究部中性子散乱研究室皆川宣明氏に感謝致します。

かる。項目6の $H_p(10)$ の結果でわかるように、2mSv程度の γ 線に対するフィルム、ガラス線量計の性能はほとんど変わらないが、原研IV型フィルムバッジについては項目1から5のような低線量域での高精度測定には無理があり、このような条件ではガラス線量計の測定性能が優れていることが明かとなった。但し項目5については基準線量値に比べてかなり低い測定値となっており、この原因としてポリエチレン減速 ^{252}Cf 線源からの γ 線のエネルギー分布の影響等が上げられると思われるが、実質的検討は現段階では行っていない。一方、 β 線量評価については原研IV型フィルムバッジを用いると $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ β 線に対してかなりの過大評価になることは過去に指摘されており¹⁵⁾、その通りの結果が得られている。ガラス線量計の β 線量評価結果は概ね良好であるが、一点だけ低い評価値となっている。この原因としては照射時の線量計の傾き等の影響が考えられるが、これについても詳細な検討は行っていない。従って今後も同プログラムに継続して参加し、上記の原因を解明することが望まれる。

5. 結言

本特性調査の結果、ガラス線量計は個人モニタリングや環境モニタリング用線量計として優れた基本特性を有していることが明かとなった。今後、現在広く利用されているフィルム線量計や熱ルミネッセンス線量計(TLD)に代わる基本的な線量計として使用されることが期待される。またガラス線量計は再現性や安定性に優れ、素子間のばらつきや経時変化もきわめて小さいことからモニタリング用としてだけでなく、基準線量値の相互比較など基準校正技術の分野での利用も実用化されつつある。原研もこのガラス線量計に関する実用化のための検討を引き続き継続することが望まれる。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、技術的助言、御指導を頂いた日本原子力研究所保健物理部南賢太郎次長に感謝致します。また、JRR-2のDMNS装置の利用に当たって御協力頂いた同材料研究部中性子散乱研究室皆川宣明氏に感謝致します。

参考文献

- 1) International Commission on Radiological Protection ; ICRP Publication 60 (1991)
- 2) J. H. Schulman, R. J. Ginter, C. C. Klick, R. S. Alger and R. A. Yevy ; J. Appl. Phys., Vol. 22, P. 1479 (1951)
- 3) 横田良助 ; 応用物理 Vol. 38, P. 1077 (1969)
- 4) 大森隆雄、池上徹、阿井孝博 ; 東芝レビュー、Vol. 39, P. 247 (1984)
- 5) 東芝硝子ガラス線量計技術資料－東芝ガラス線量計システム 個人被ばく管理・環境モニタリング－より
- 6) International Commission on Radiation Units and Measurements ; ICRU Report 47 (1992)
- 7) International Commission on Radiological Protection ; ICRP Publication 51 (1987)
- 8) 神之浦文三 ; JAERI M 89-212, P. 251 (1989)
- 9) 日本工業規格 JIS Z 4331 (1989)
- 10) International Organization for Standardization ; ISO 6980 (1984)
- 11) International Commission on Radiological Protection ; ICRP Publication 35 (1982)
- 12) 池上徹 ; 私信
- 13) 大森隆雄、長田正省 ; 東芝レビュー、Vol. 34, P. 161 (1979)
- 14) 清水滋 ; 私信
- 15) 村上博幸、関武雄 ; 日本保健物理学会第 22 回研究発表会要旨集 P. 22 (1987)

Table 1 Filters of Glass Dosimeter Type GD-400

Type	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4
GD-402	Sn (1mm)	Al (1mm)	-	Cd (1mm)
GD-403	Sn (1mm)	Al (1mm)	PET(38μm)	PET(250μm)

PET : Polyethylene-terephthalate.

The figure in parenthesis means thickness of each filter material.

Table 2 Filter of Glass Dosimeter Type SC-1

Type	Filter thickness
SC-1	Sn (0.75 mm)

Table 3 Response of Glass Dosimeter Type GD-403
for Extremely Low or High Energy Photons

Source	Effective Energy (keV)	Reference $H_p(10)$ (mSv)	Measured $H_p(10)$ (mSv)	Response (Measured/Reference)
X-ray QI=0.8	8.5	(0.017) [#]	0	0
	16.2	0.628	0.276	0.439
	32.1	2.042	2.058	1.008
¹⁶ N	6360	0.58	0.678	1.169

The dose value was tentatively obtained using the conversion factor for 10 keV photons.

Table 4 Categories of Mixed Irradiation

Reference Radiation (A)	Additional Radiation (B)	Range of Dose Quotient A/B
γ -ray (^{137}Cs)	X-ray 24.1 keV	1, 10
	48.6	1/10 - 10
	80.0	1/10 - 10
	119	1, 10
	β -ray $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ ^{204}Tl	1/20 - 10
		1/15 - 10
X-ray (80.0 keV)	X-ray 48.6 keV	1/10 - 10
	β -ray $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ ^{204}Tl	1/10 - 10 1/10 - 5
X-ray (48.6 keV)	β -ray $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ ^{204}Tl	1/10 - 10 1/10 - 2
	β -ray ^{204}Tl	1/5 - 5

Table 5 Glass Dosimeter Response Ratio between
1 Hour and 1 Day after Irradiation

Storage temperature (°C)	0	20	40
Response ratio (1hour/1day)	0.868	0.781	0.753

Table 6 JAERI's Results in Personal Dosimeter
Intercomparison conducted by ORNL in 1992

Category No.	Reference Dose Value (mSv)		Reported Dose Value (mSv)			
	$\gamma(X)$	β	$H_p(10)$		$H_p(0.07)$	
			Film	GD	Film	GD
1	0.21	-	0.36	0.24		
			0.36	0.24		
			0.36	0.25		
2	0.03	-	0.07	0.04		
			0.07	0.04		
			0.07	0.04		
3	0.21	-	0.39	0.23		
			0.41	0.24		
			0.34	0.24		
4	0.05	-	0.14	0.07		
			0.09	0.07		
			0.11	0.08		
5	0.21	-	0.22	0.14		
			0.29	0.14		
			0.24	0.14		
6	1.83	0.73	2.01	1.99	3.13	2.64
			2.02	1.98	2.97	2.66
			1.92	1.97	3.18	2.45
7	0.56	-	0.68	0.61		
			0.68	0.61		
			0.68	0.62		

Note: Reference dose values were reported by ORNL.

"GD" means Glass Dosimeter.

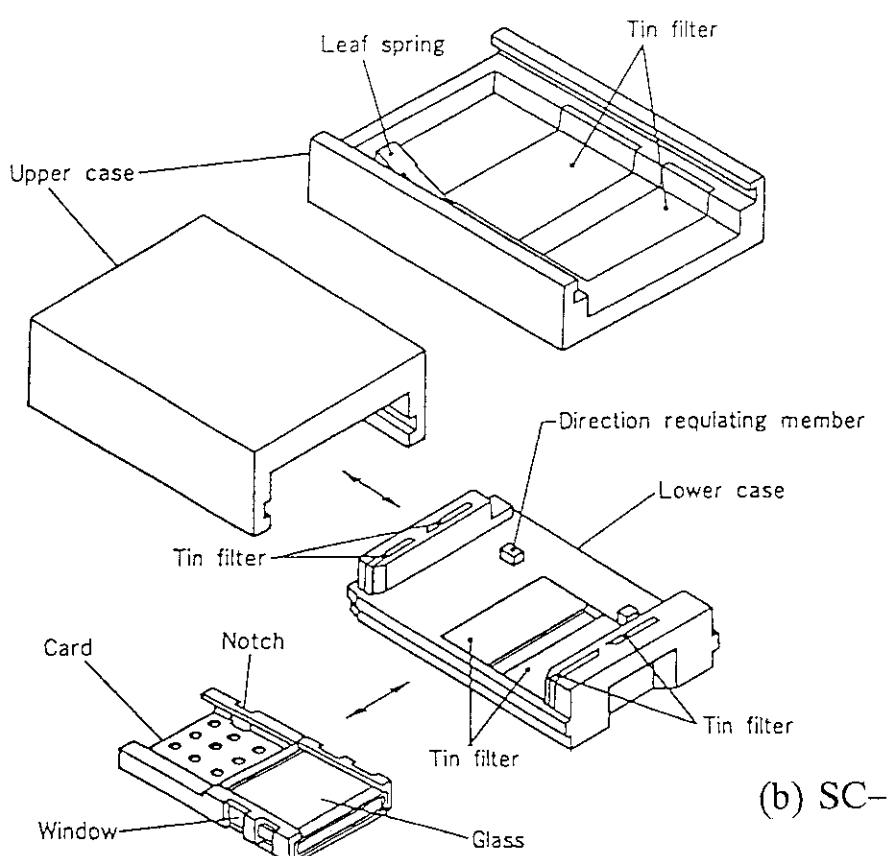
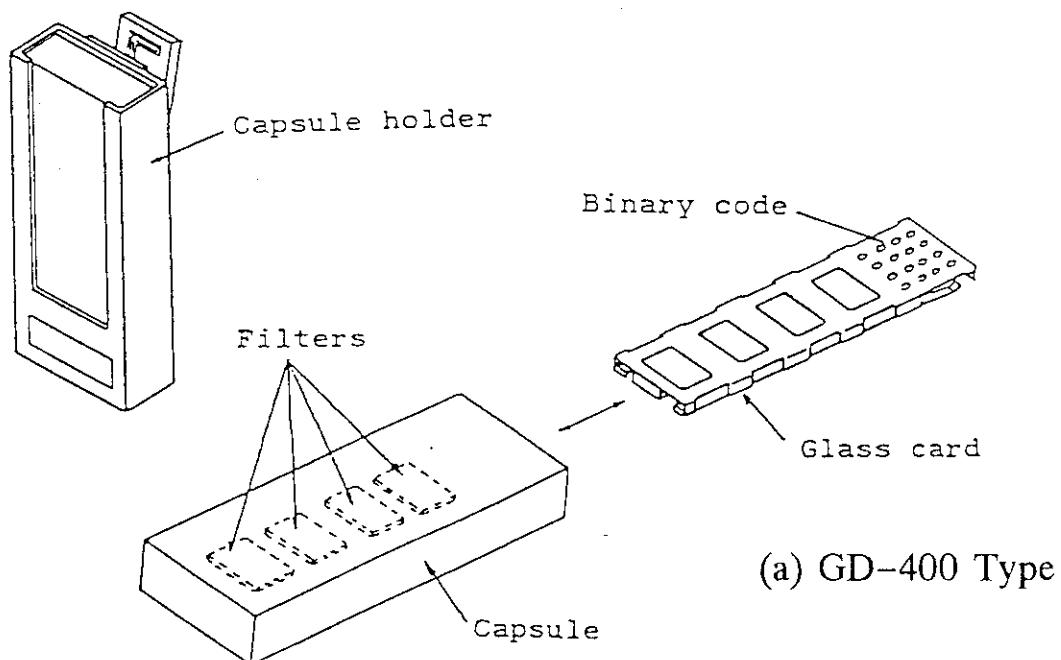
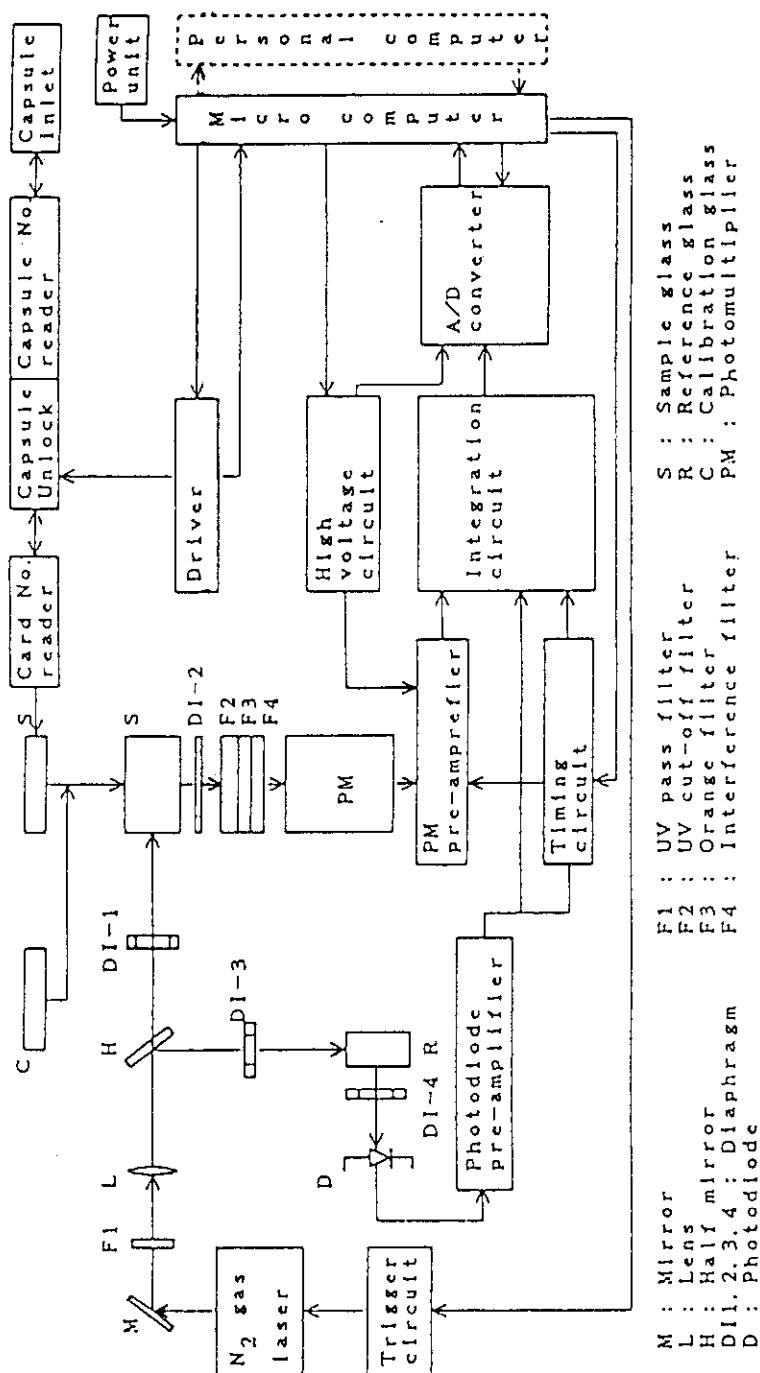


Fig.1 Structure of RPL Glass Dosimeter⁵⁾

Fig.2 Schematic Diagram of Readout System Using Pulsed UV Laser Excitation⁵⁾

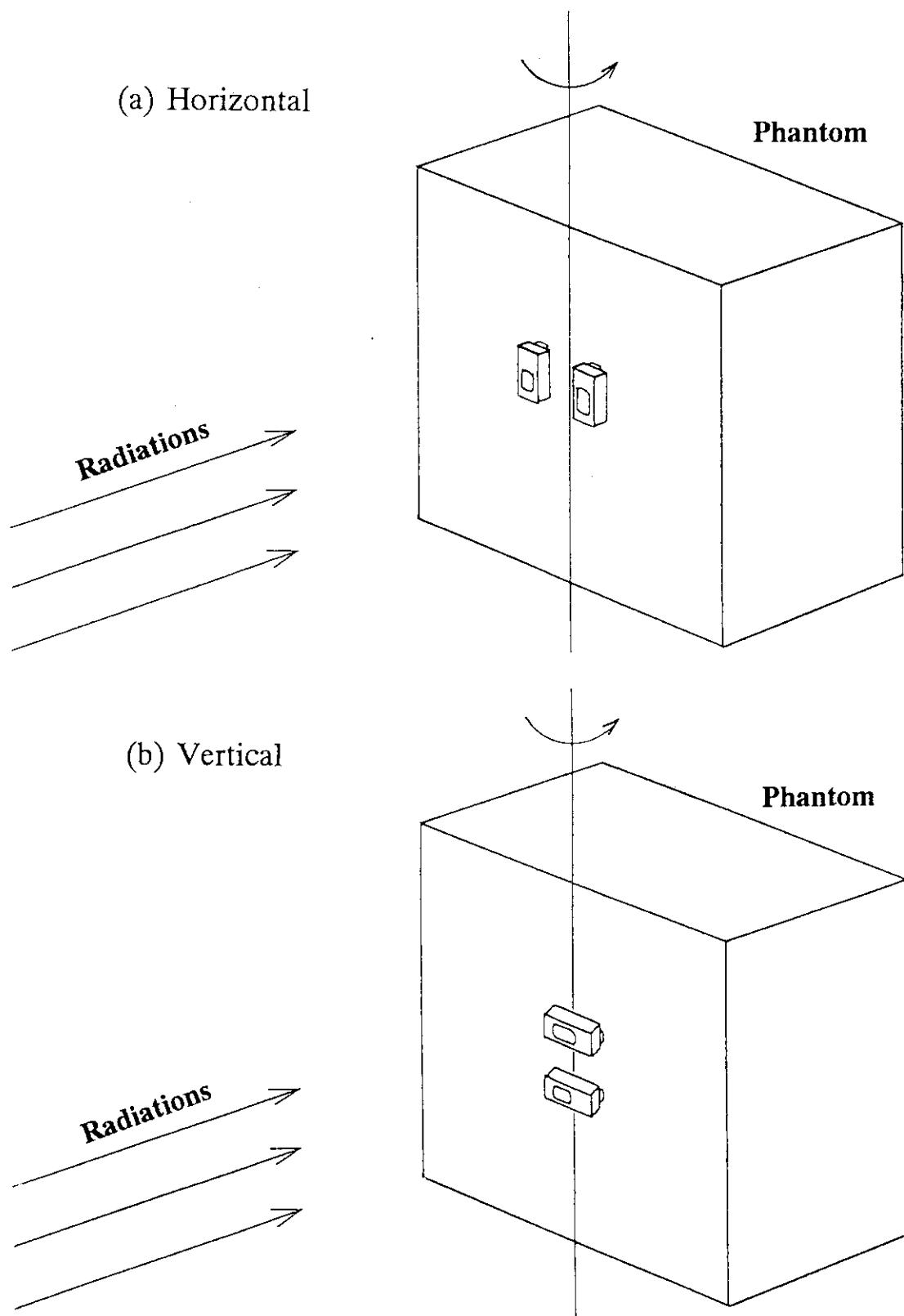


Fig.3 Irradiation of Dosimeters on Phantom

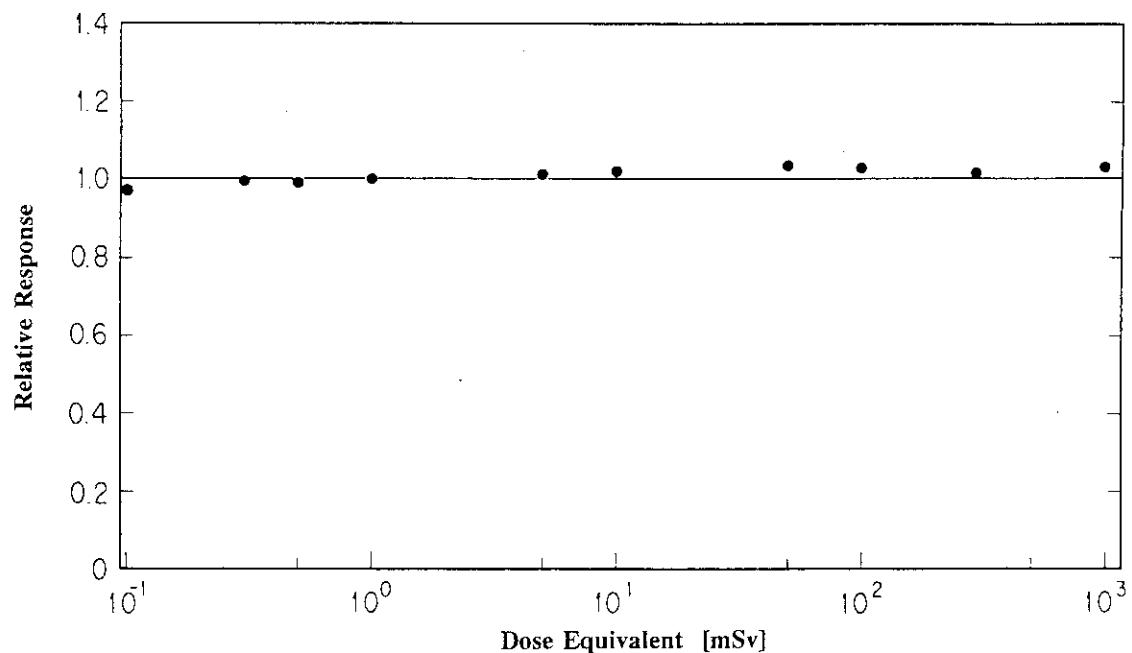


Fig.4 Dose Dependence Linearity of Glass Dosimeter GD-403 obtained by the irradiation of ^{60}Co γ -rays

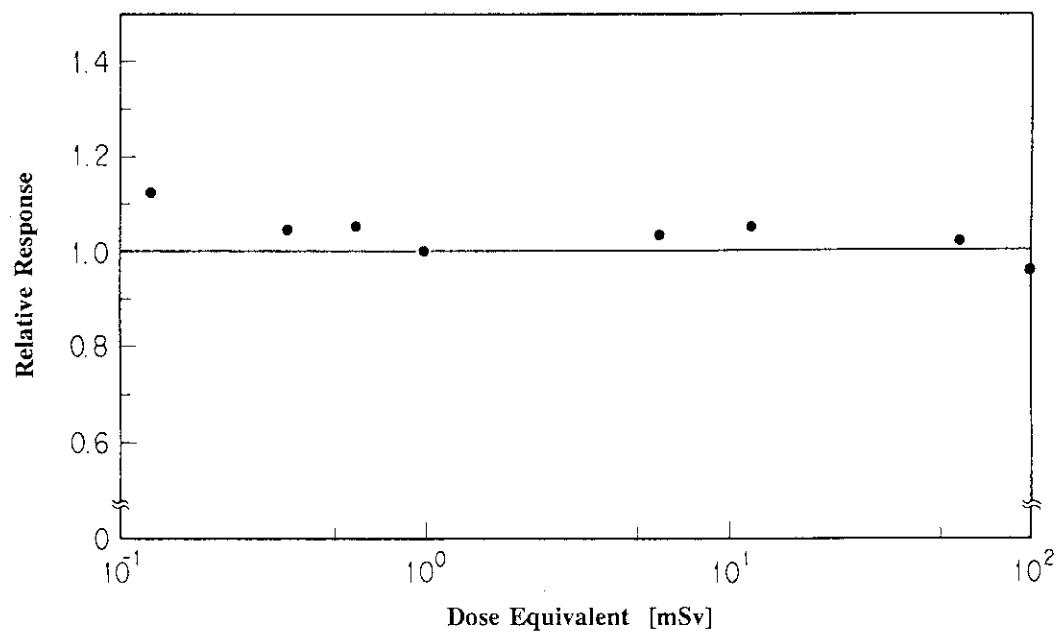


Fig.5 Dose Dependence Linearity of Glass Dosimeter GD-403 obtained by the irradiation of $^{89}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ β -rays

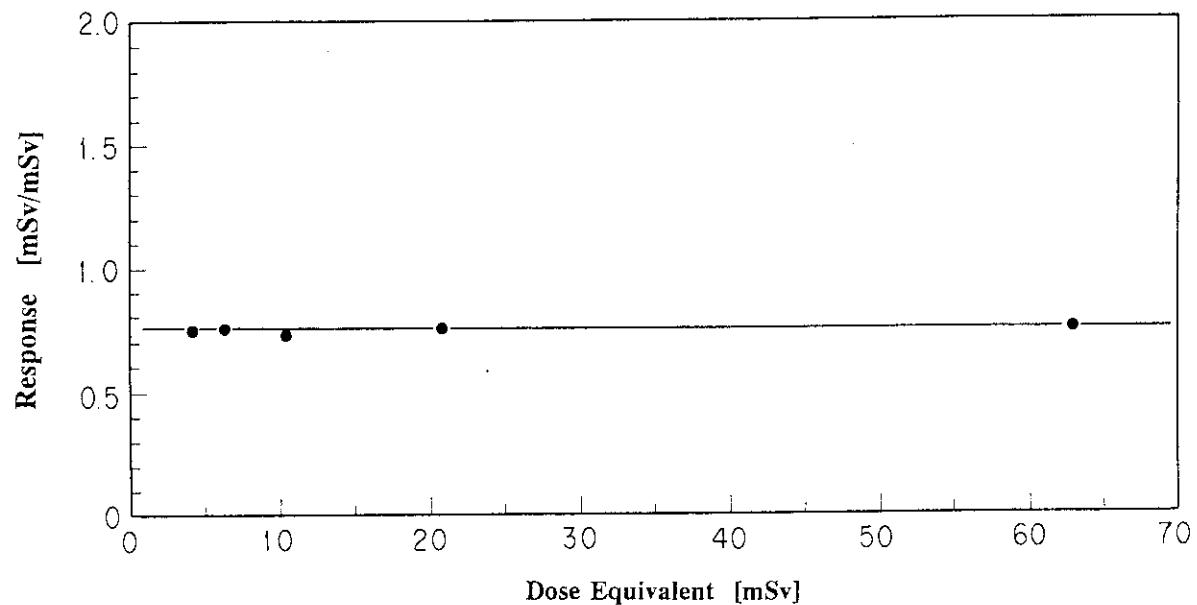


Fig.6 Dose Dependence Linearity of Glass Dosimeter GD-402 obtained by the irradiation of Thermal Neutrons

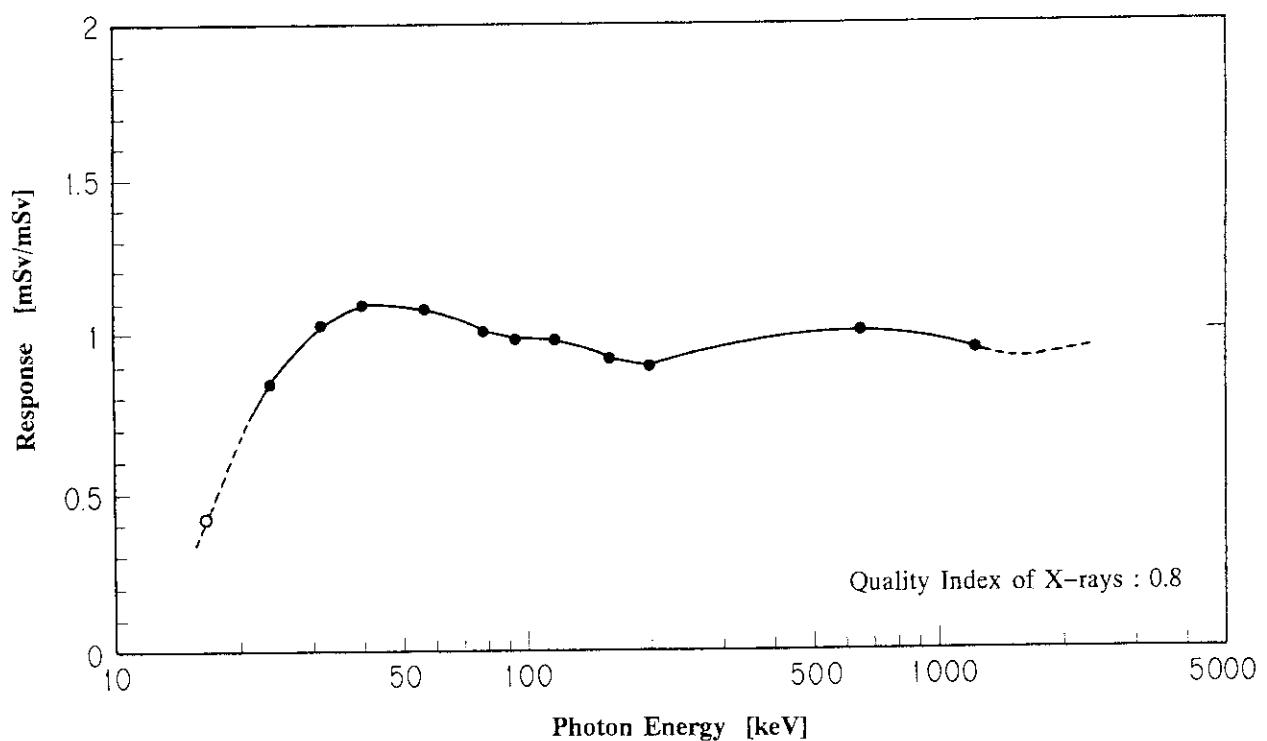


Fig.7 Response of Glass Dosimeter GD-403 on Personal Dose Equivalent $H_p(10)$ as a function of Photon Energy (QI = 0.8)

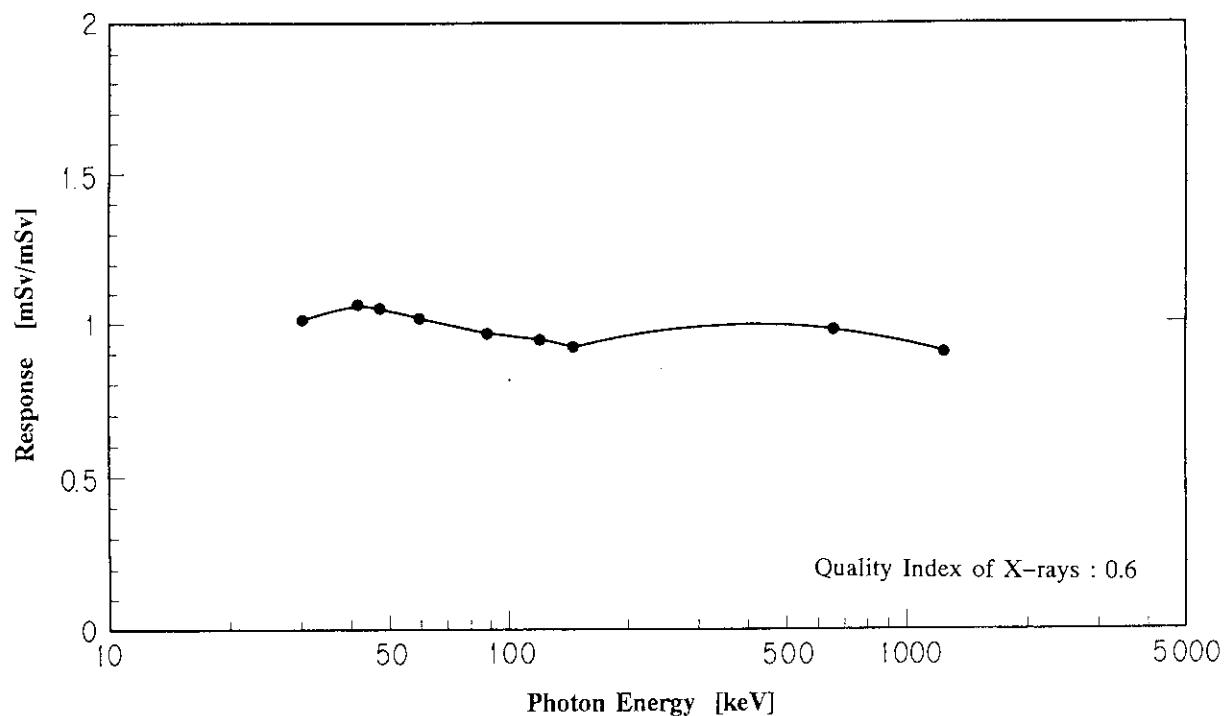


Fig.8 Response of Glass Dosimeter GD-403 on Personal Dose Equivalent $H_p(10)$ as a function of Photon Energy ($QI = 0.6$)

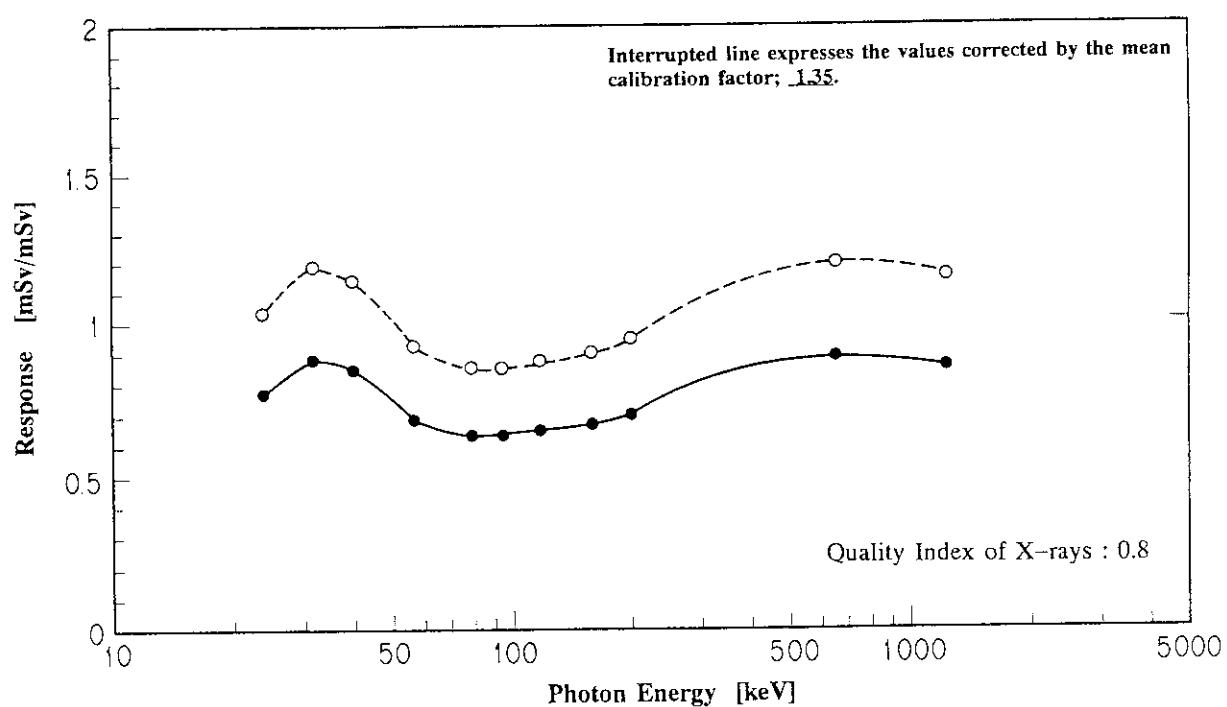


Fig.9 Response of Glass Dosimeter GD-403 on Ambient Dose Equivalent $H^*(10)$ as a function of Photon Energy

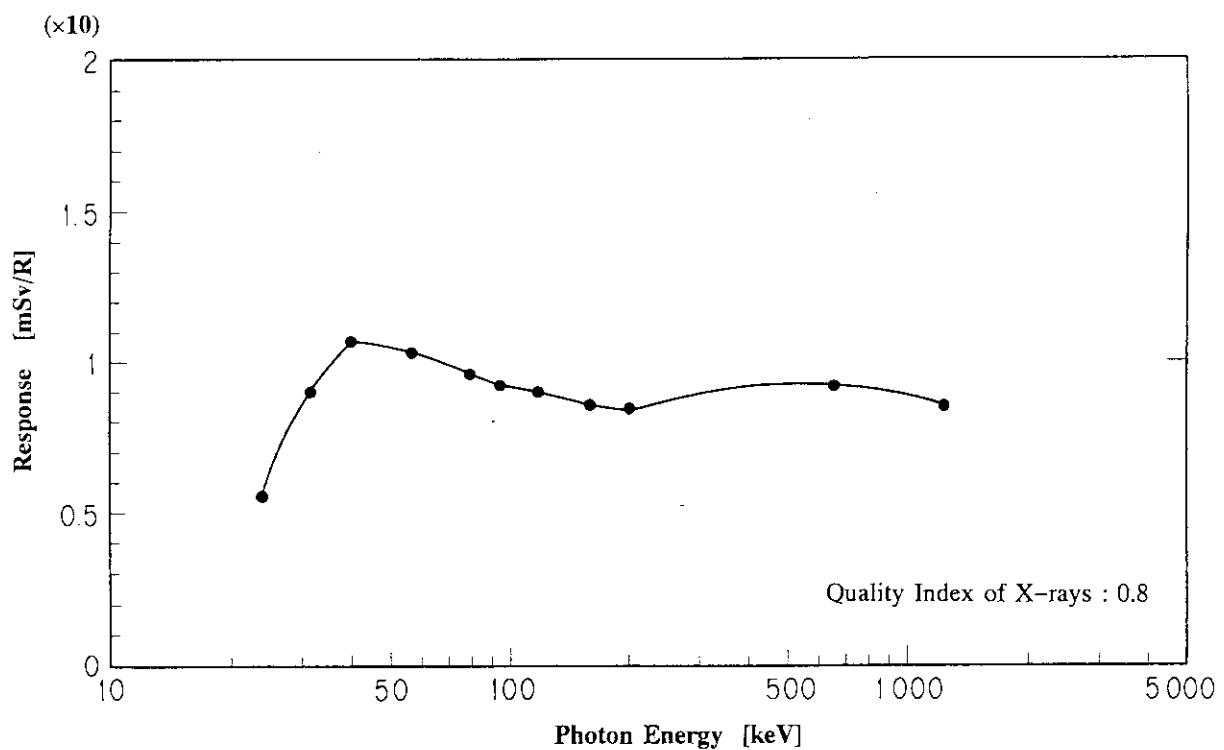


Fig.10 Response of Glass Dosimeter GD-403 on Exposure as a function of Photon Energy

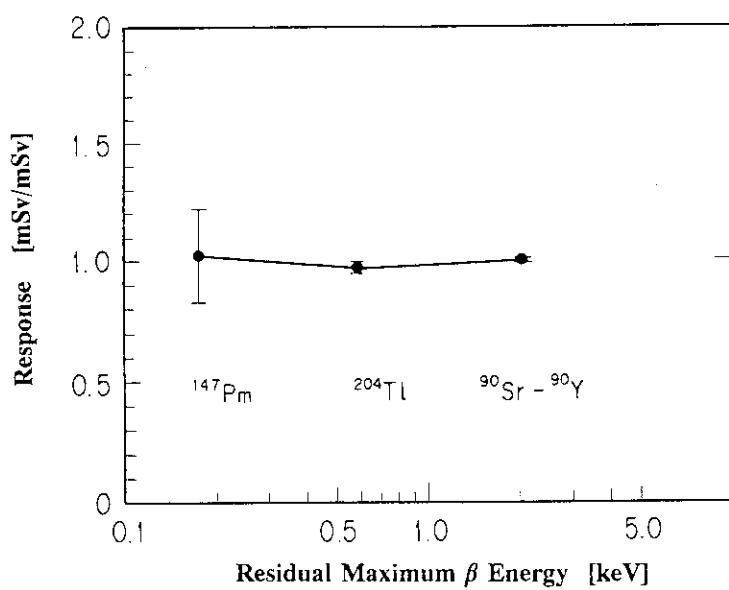


Fig.11 Response of Glass Dosimeter GD-403 on Personal Dose Equivalent $H_p(0.07)$ as a function of β Energy

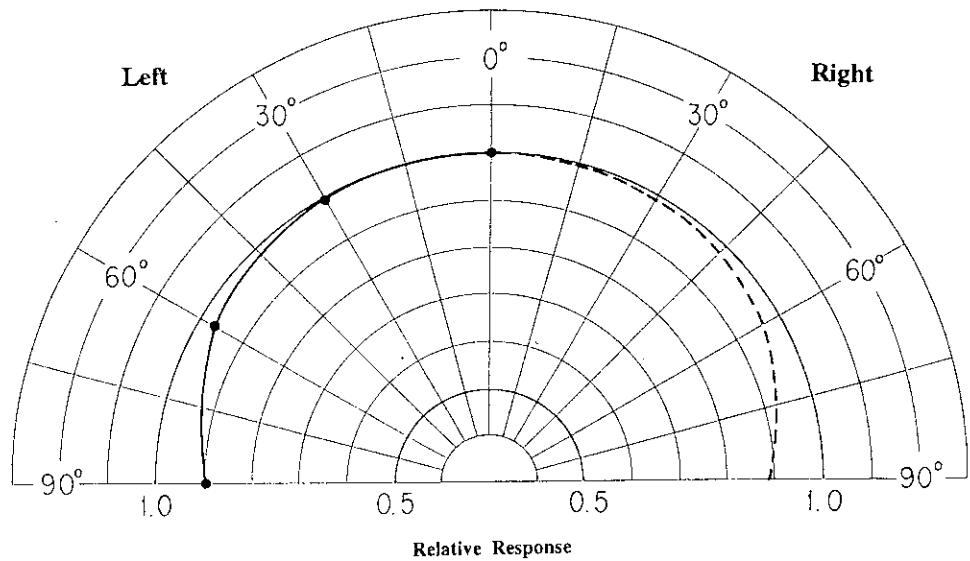


Fig.12 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-403 for ^{137}Cs γ -rays compared with normal condition [Horizontal Variation]

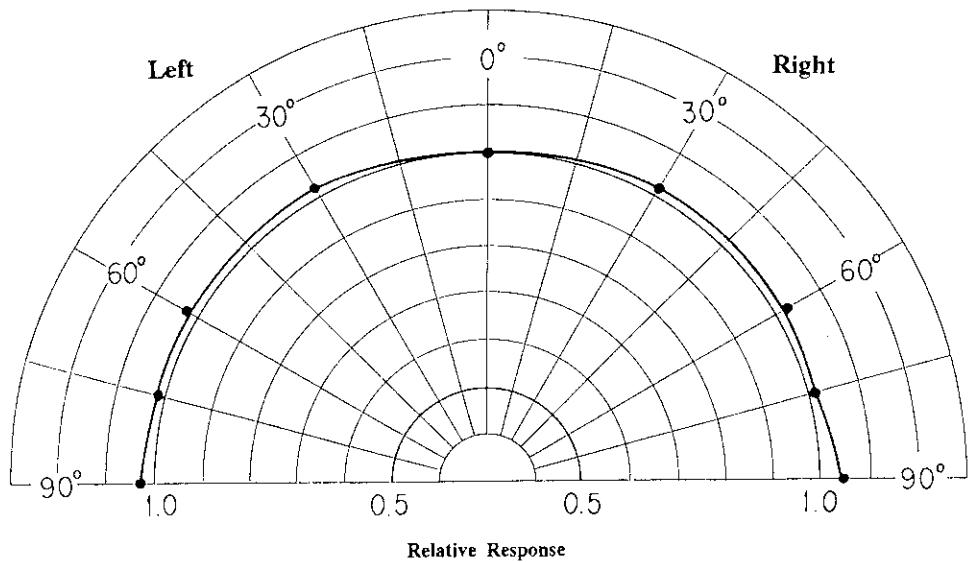


Fig.13 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-403 for ^{60}Co γ -rays compared with normal condition [Horizontal Variation]

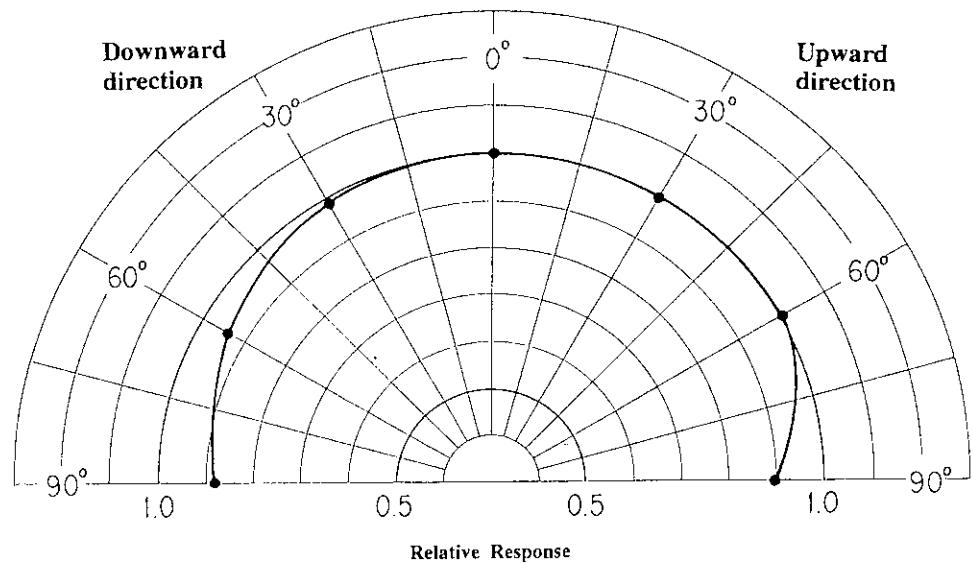


Fig.14 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-403 for ^{137}Cs γ -rays compared with normal condition [Vertical Variation]

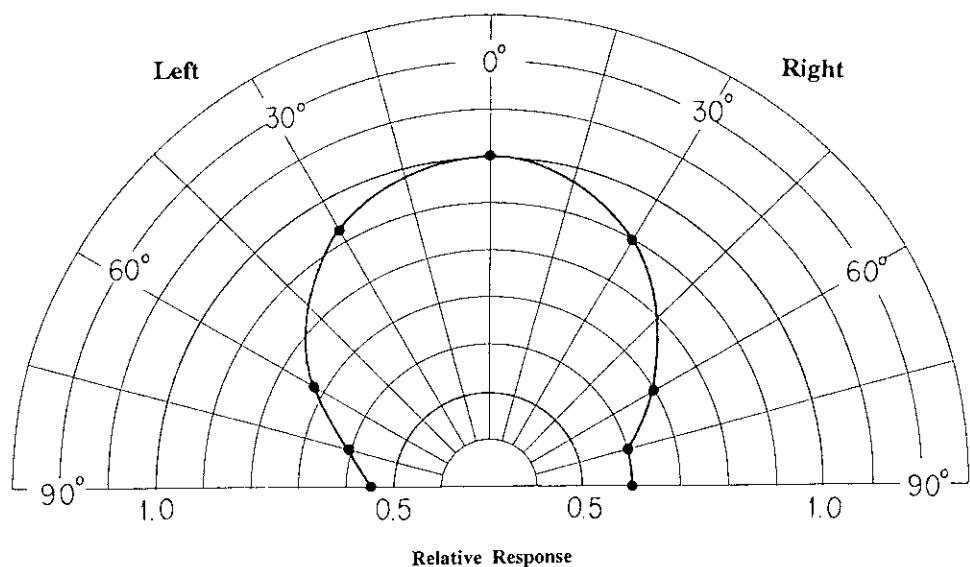


Fig.15 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-403 for X-rays (80keV) compared with normal condition [Horizontal Variation]

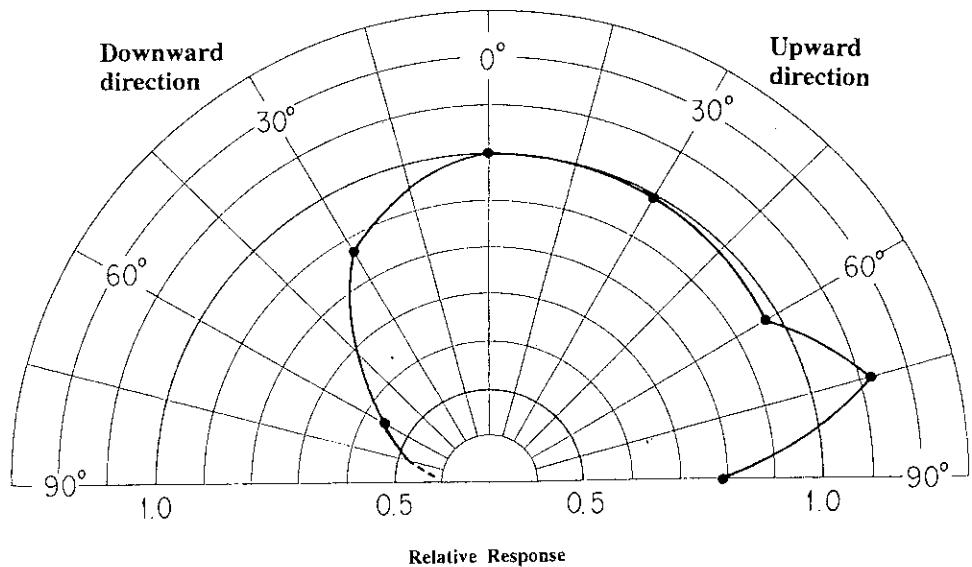
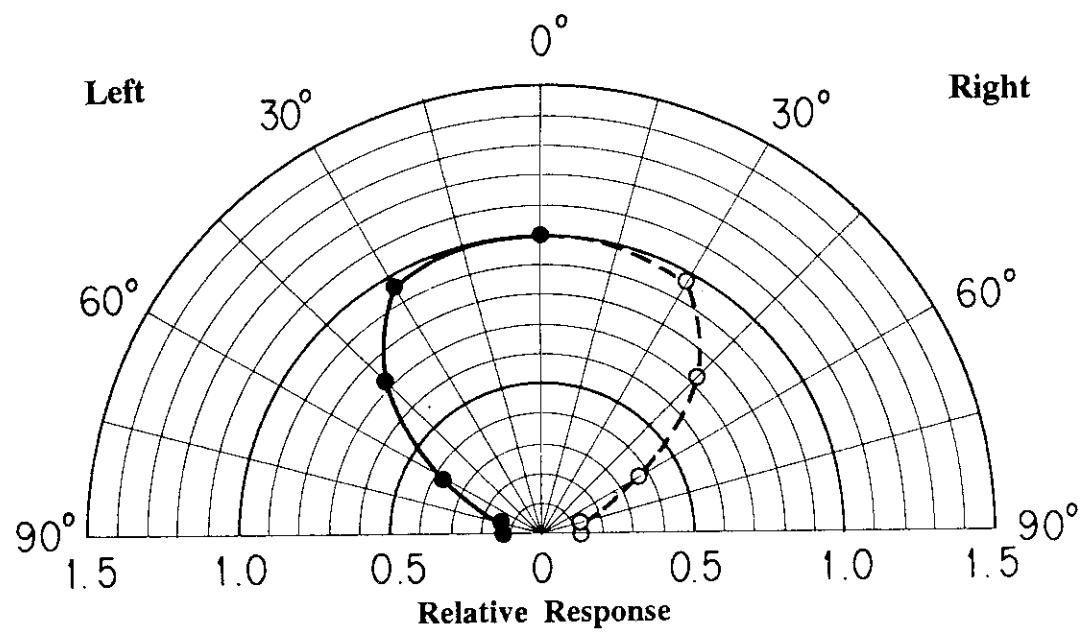
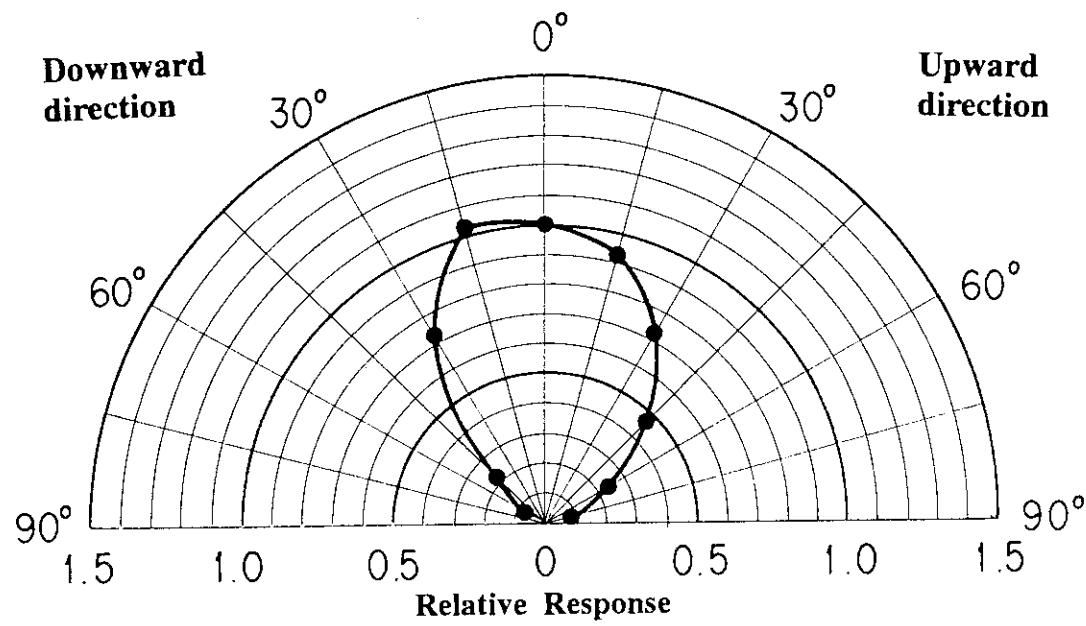


Fig.16 Incident Angle Dependence of Glass dosimeter GD-403 for X-rays (80 keV)
compared with normal condition [Vertical Variation]

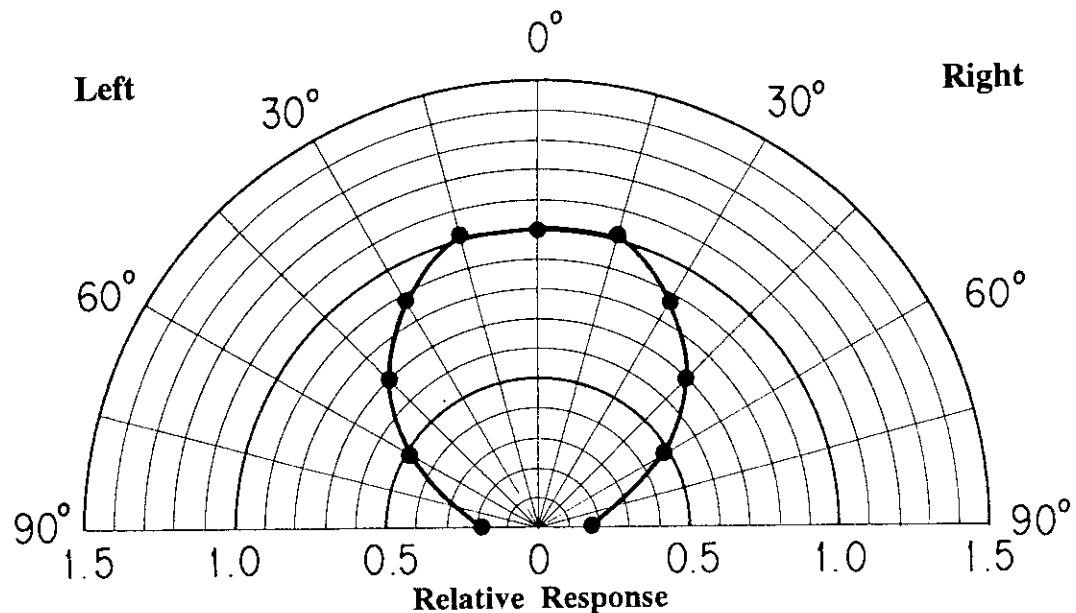


(a) Horizontal Variation

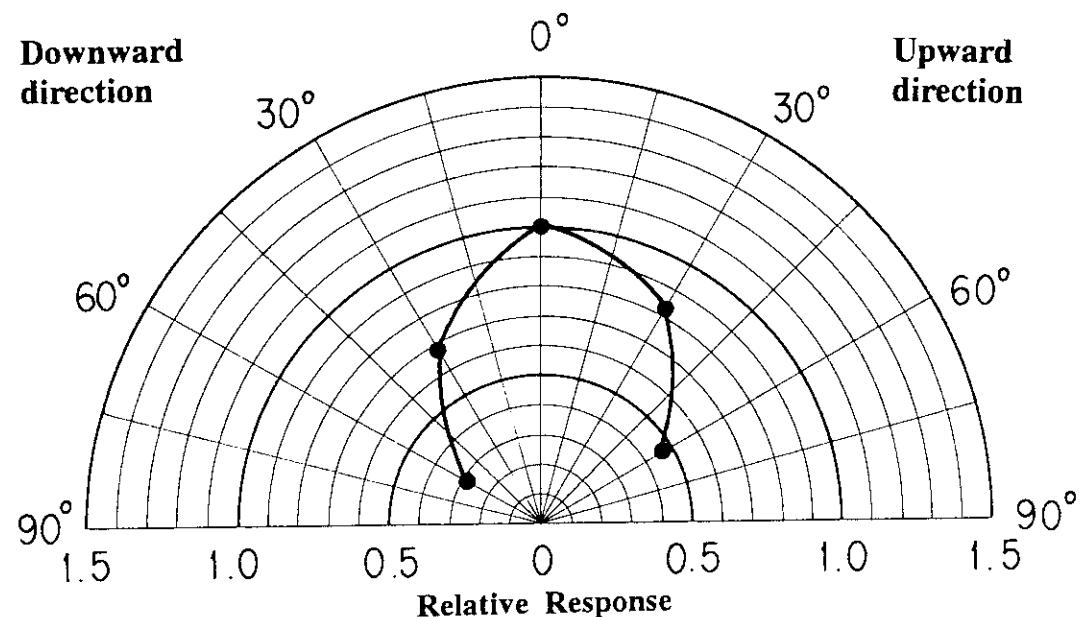


(b) Vertical Variation

Fig.17 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-403 for $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ β -rays compared with normal condition

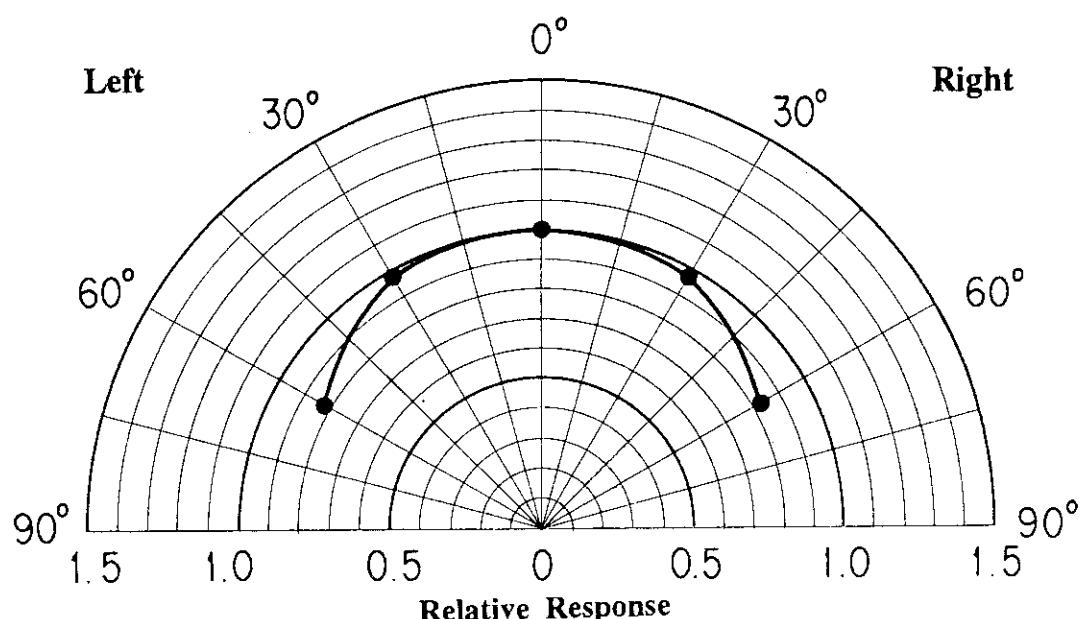


(a) Horizontal Variation

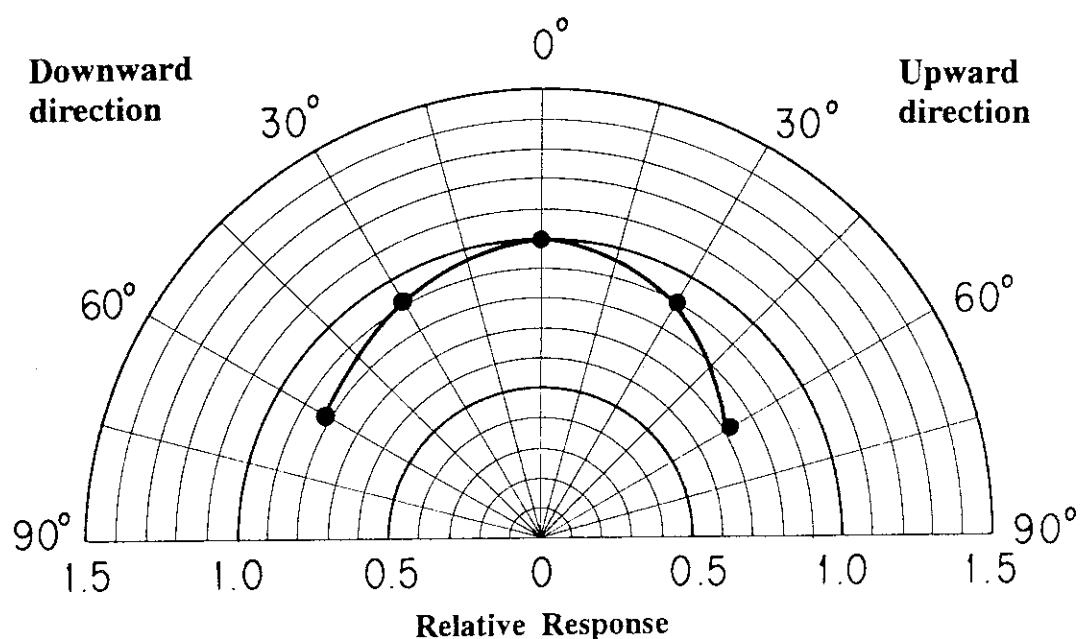


(b) Vertical Variation

Fig.18 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-402 for Thermal Neutrons compared with normal condition obtained by the irradiations using DMNS Apparatus



(a) Horizontal Variation



(b) Vertical Variation

Fig.19 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter GD-402 for Thermal Neutrons compared with normal condition obtained by the irradiations using Graphite pile

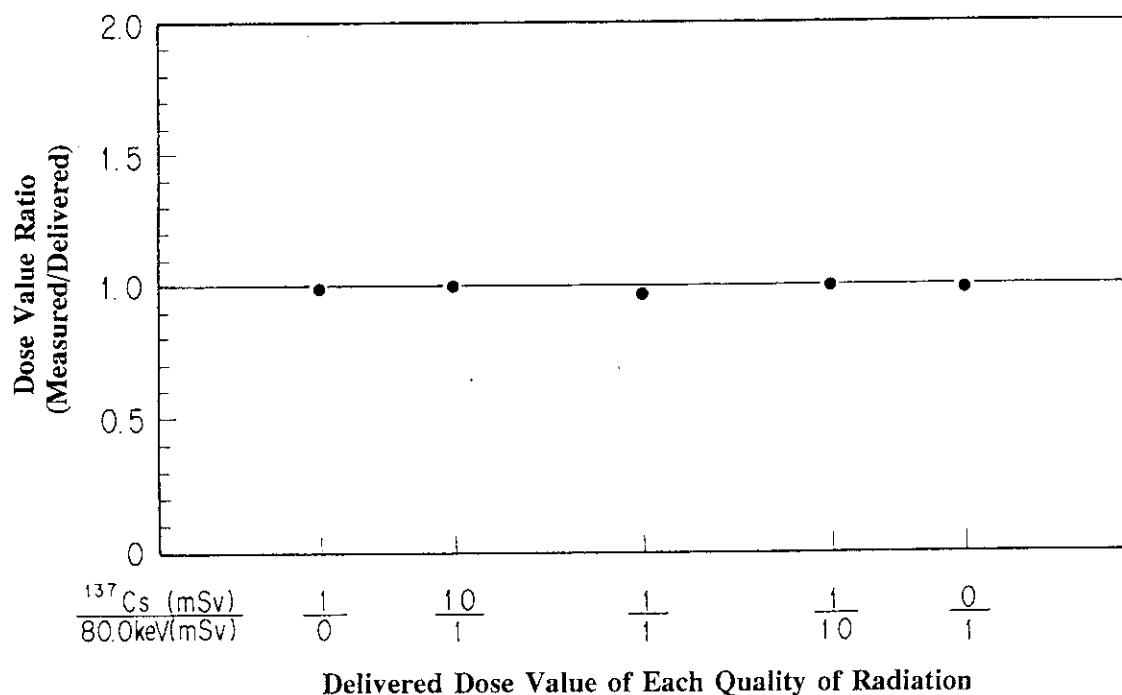


Fig.20 Dose Evaluation Performance of RPL Glass Dosimeter GD-403 on mixed irradiation condition [$\gamma + X$]

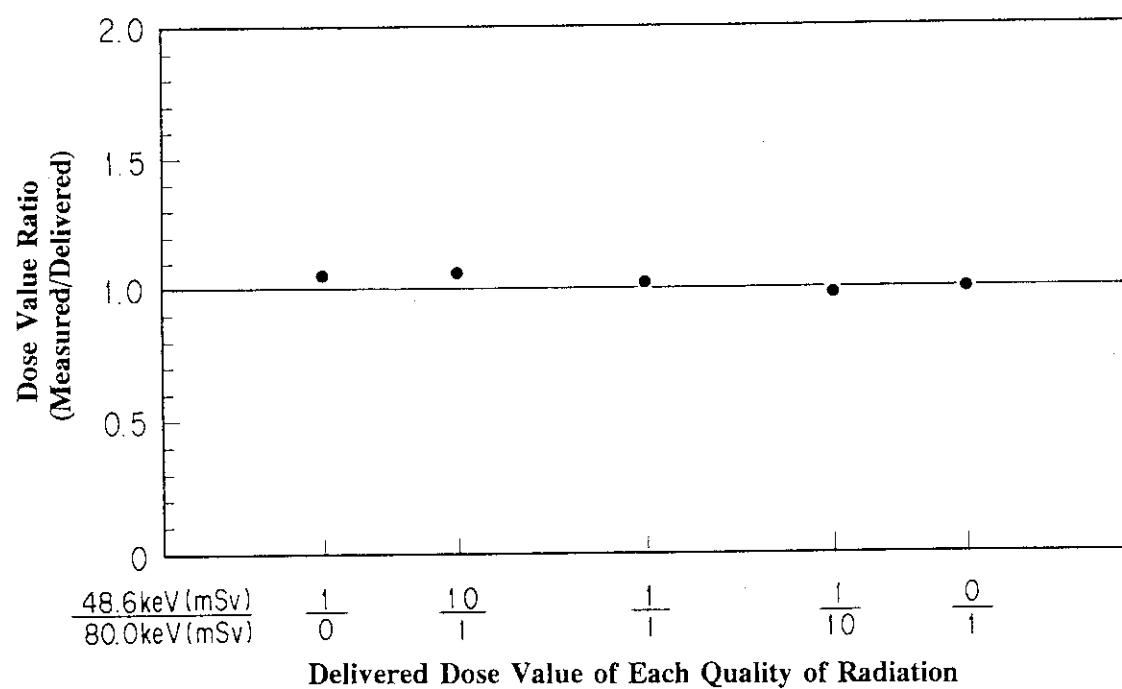


Fig.21 Dose Evaluation Performance of RPL Glass Dosimeter GD-403 on mixed irradiation condition [X + X]

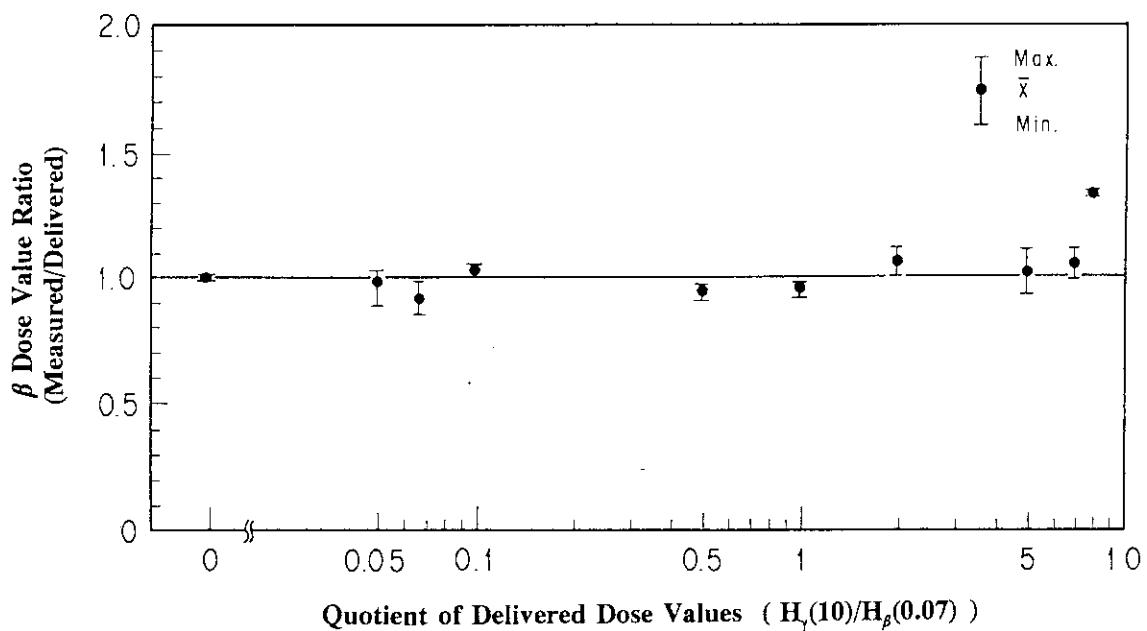


Fig.22 Beta Dose Evaluation Performance of RPL Glass Dosimeter GD-403 on mixed irradiation condition [$\beta + \gamma$] by $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ & ^{137}Cs Sources

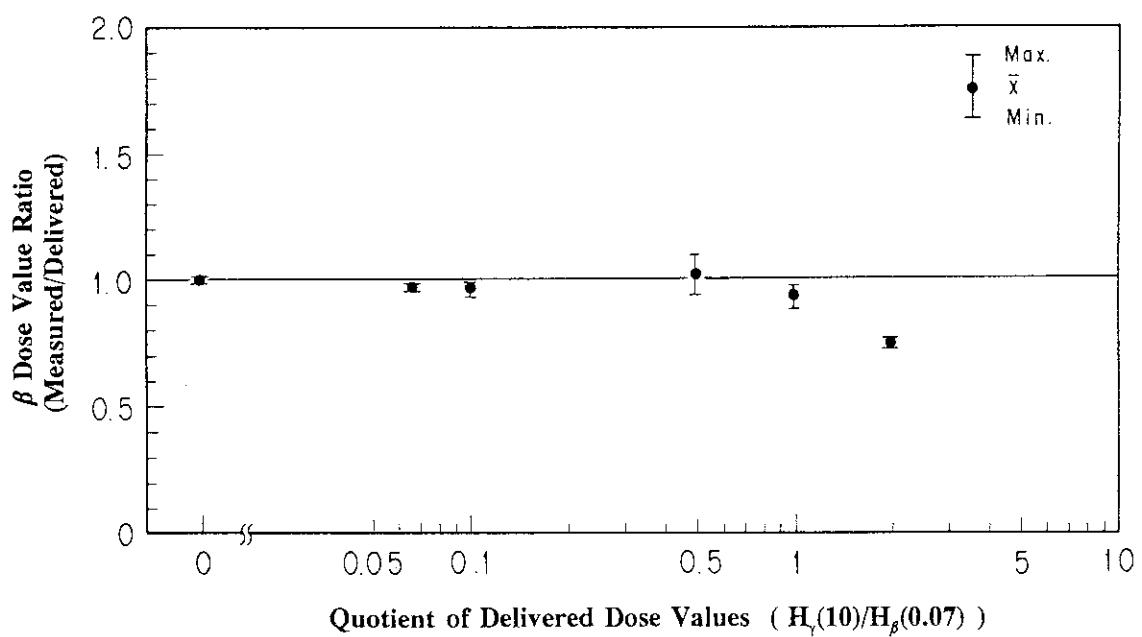


Fig.23 Beta Dose Evaluation Performance of RPL Glass Dosimeter GD-403 on mixed irradiation condition [$\beta + \gamma$] by ^{204}Tl & ^{137}Cs Sources

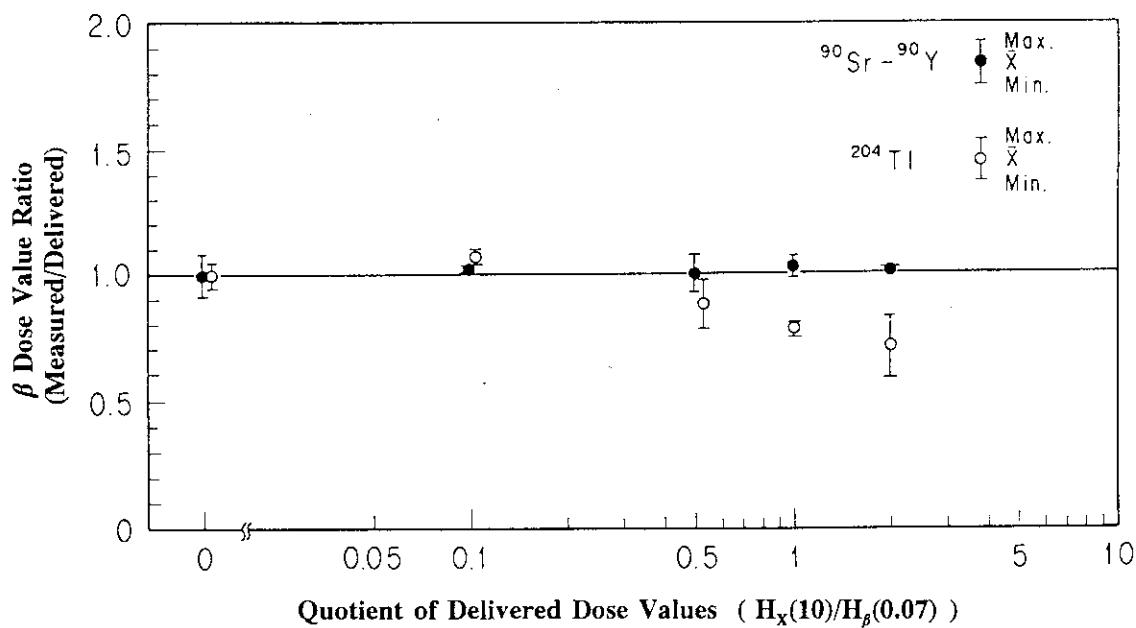


Fig.24 Beta Dose Evaluation Performance of RPL Glass Dosimeter GD-403 on mixed irradiation condition [$\beta + X$] by ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{204}Tl & X-rays (80 keV)

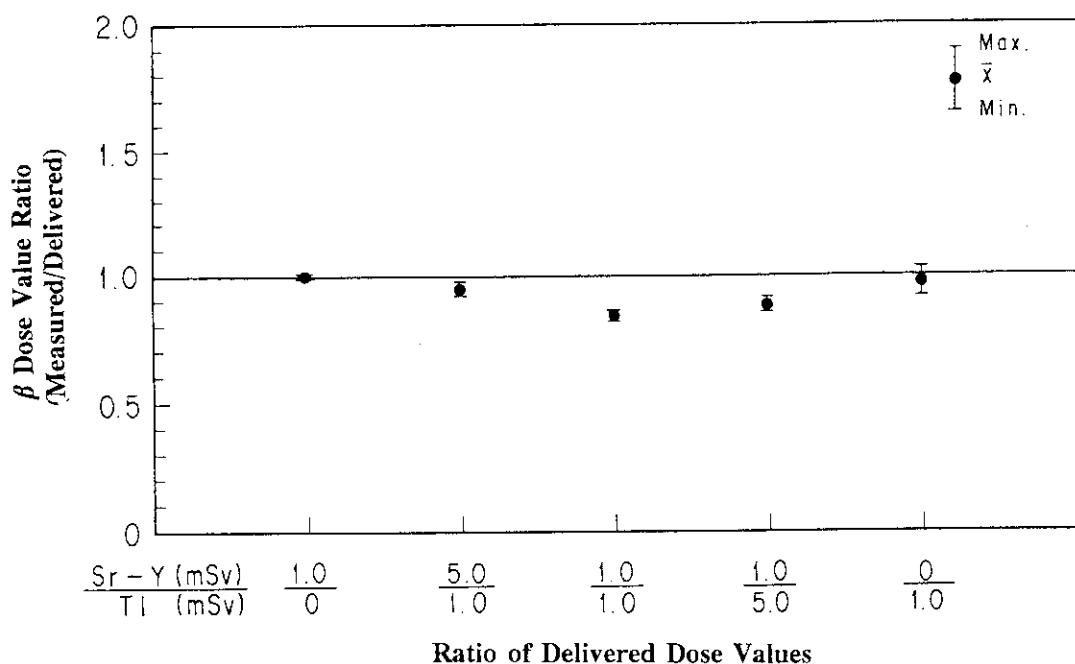
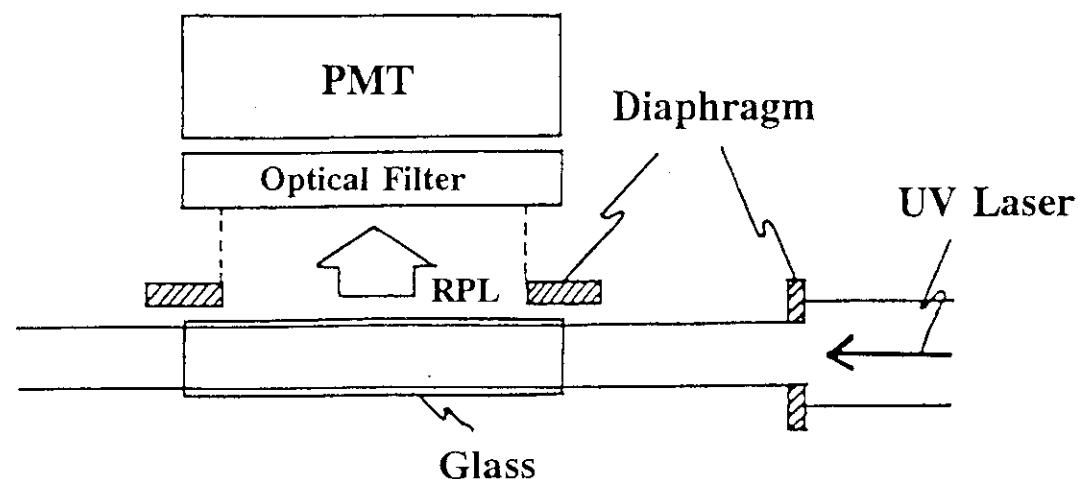
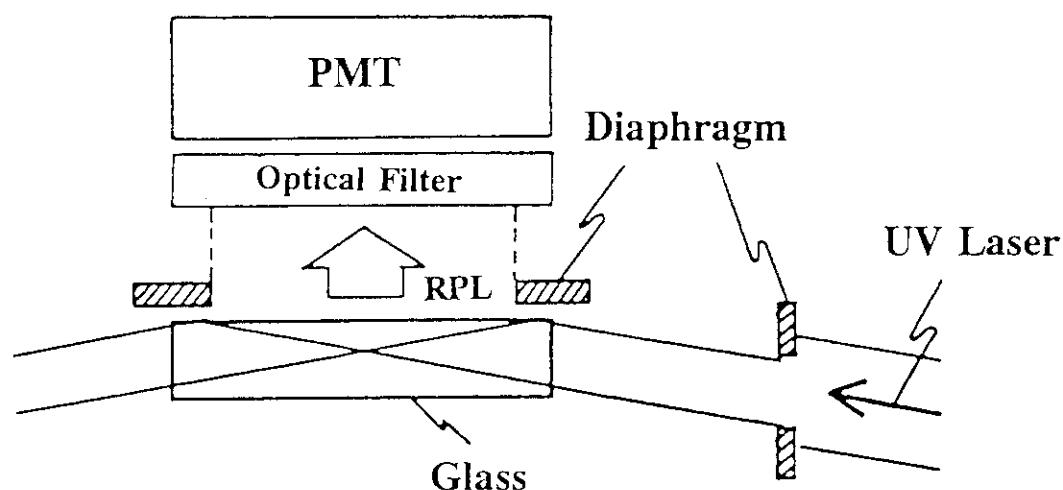


Fig.25 Beta Dose Evaluation Performance of RPL Glass Dosimeter GD-403 on mixed irradiation condition by ^{90}Sr - ^{90}Y and ^{204}Tl



Ordinary Method



New Method

Fig.26 RPL Reading Method¹²⁾

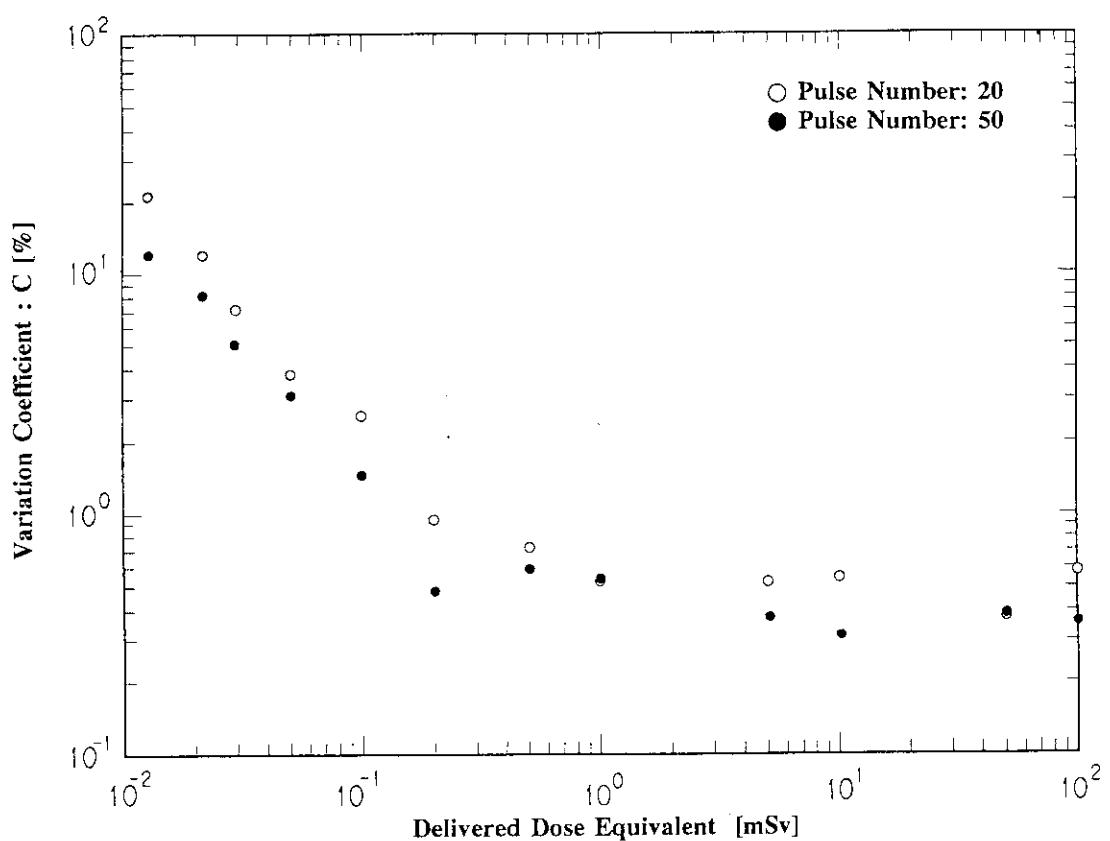


Fig.27 Reproducibility of Glass Dosimeter Readings (Type GD-400)

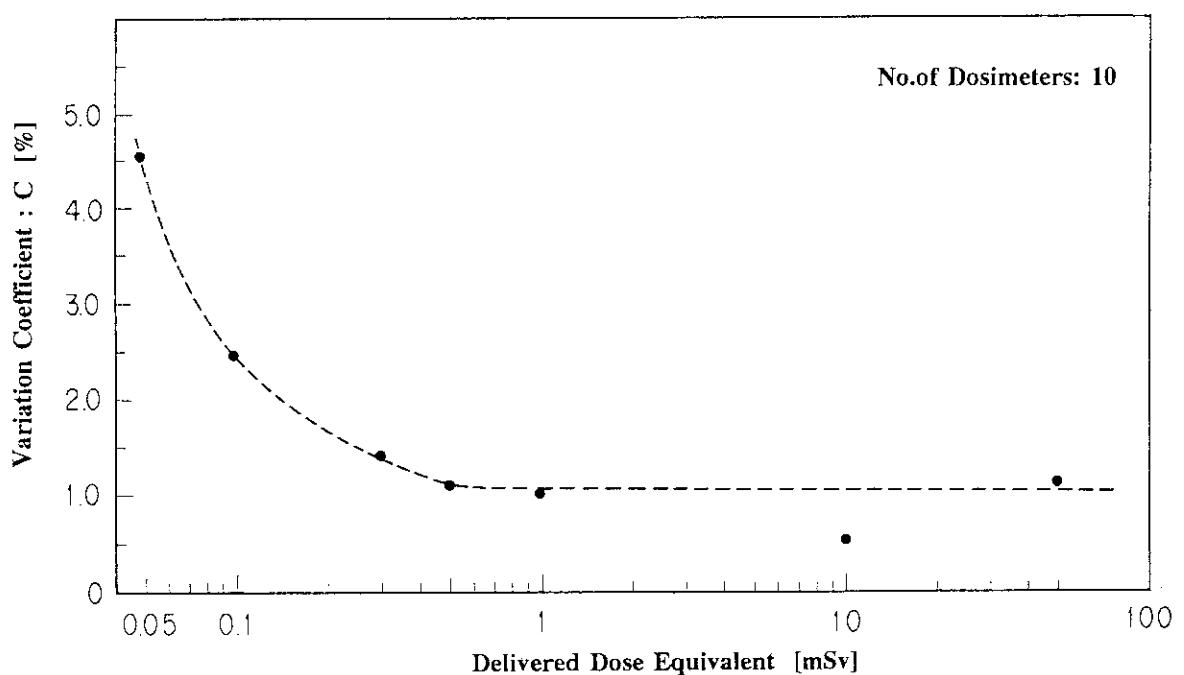


Fig.28 Batch Uniformity of Glass Dosimeter GD-403

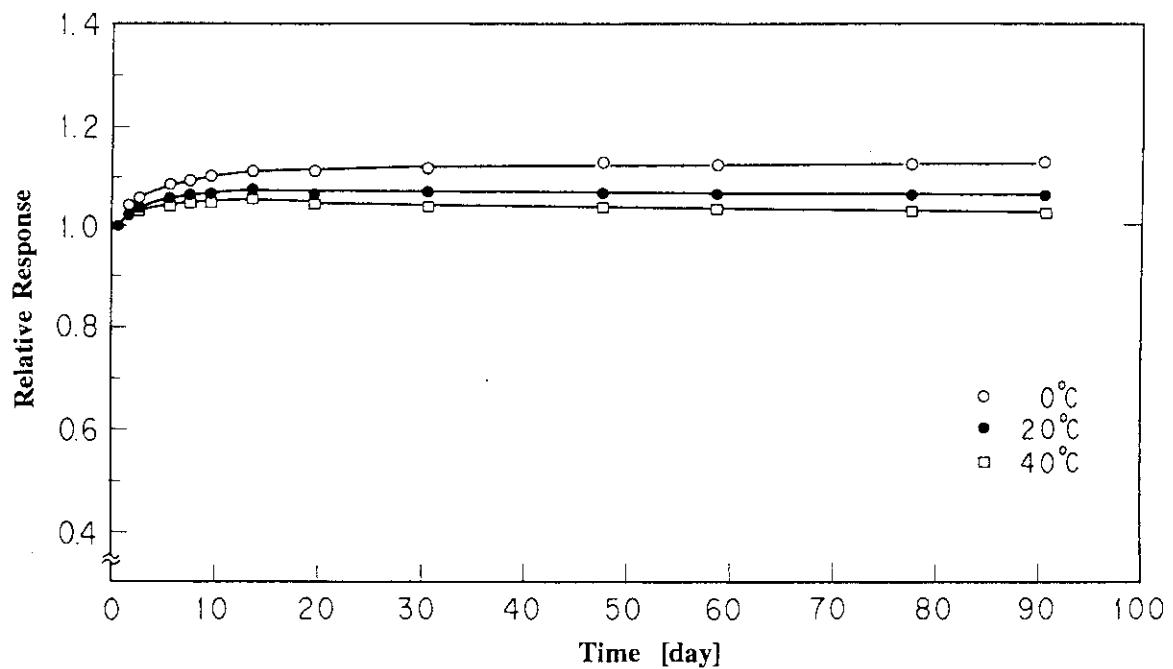


Fig.29 Time Dependence of Glass Dosimeter Readings (Type GD-400)

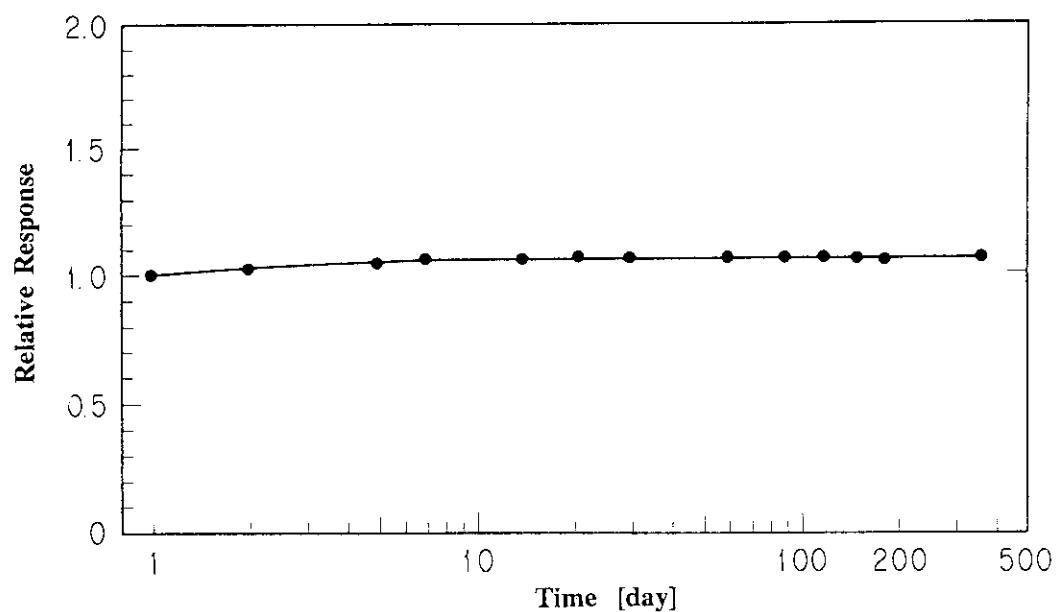


Fig.30 Long Time Stability of Glass Dosimeter Readings (Type GD-400)

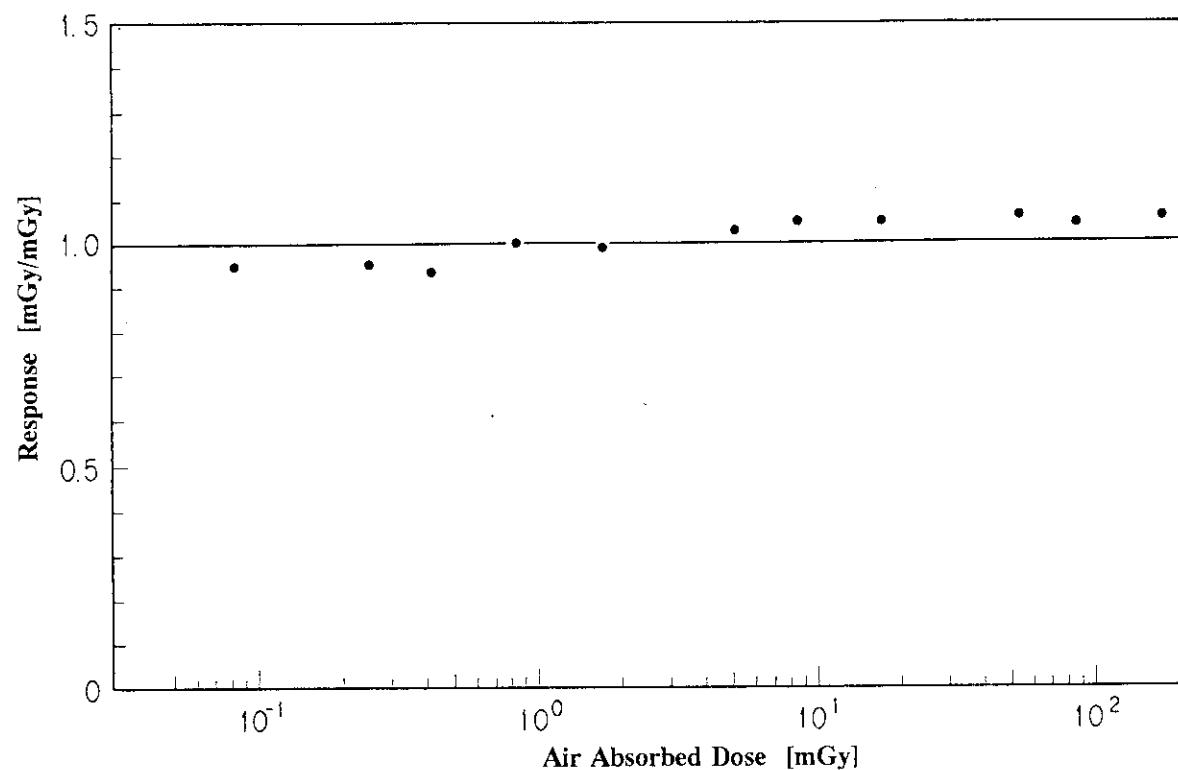


Fig.31 Dose Dependence Linearity of Glass Dosimeter Type SC-1 obtained by the irradiation of ^{60}Co γ -rays

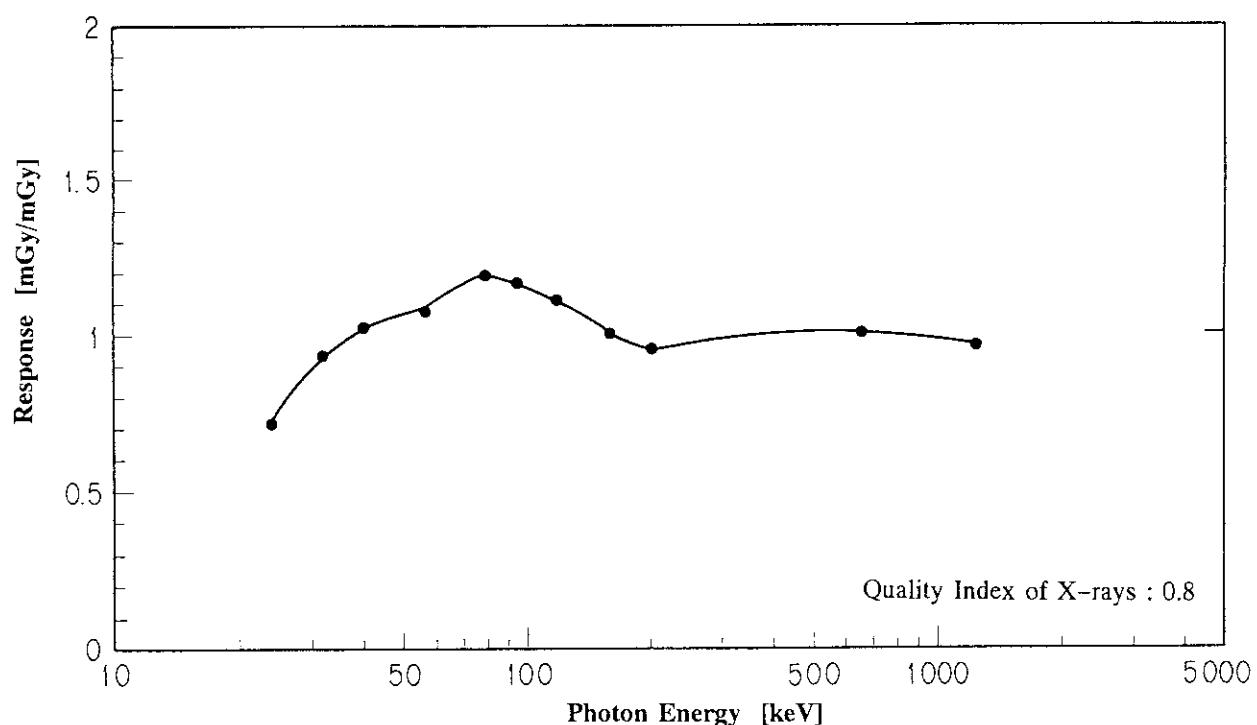


Fig.32 Energy Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for Photons on Air Absorbed Dose

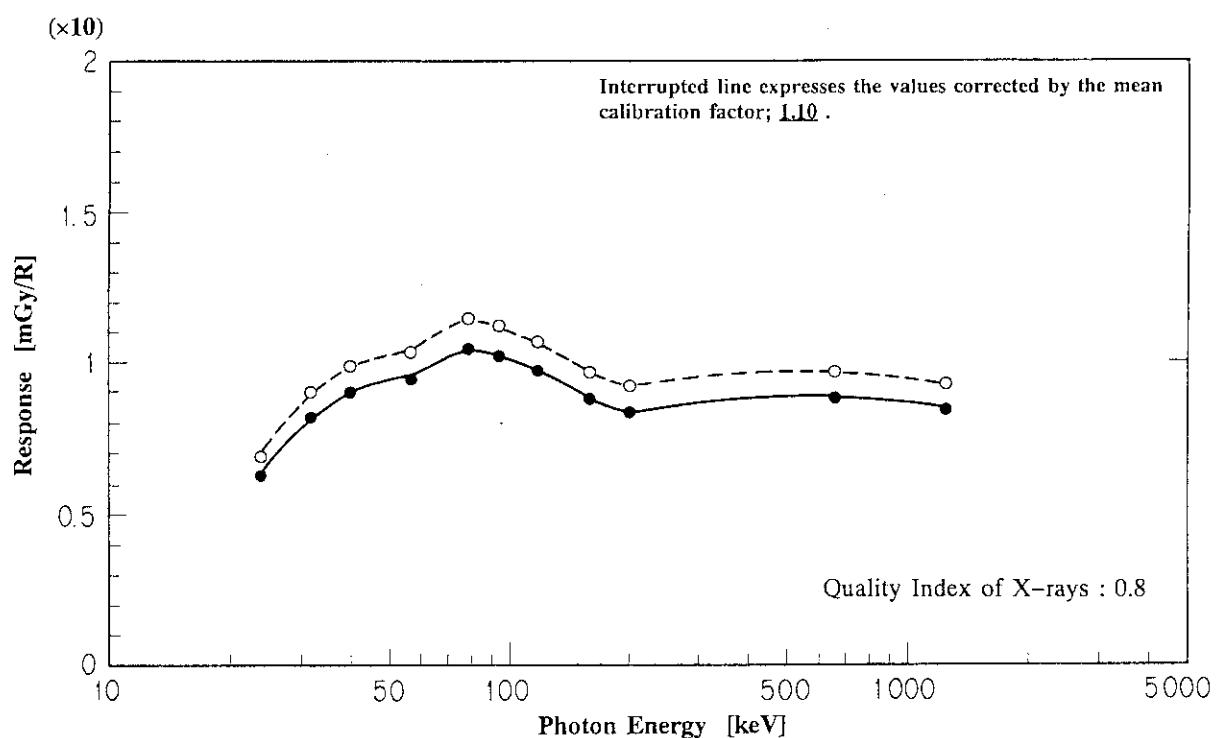
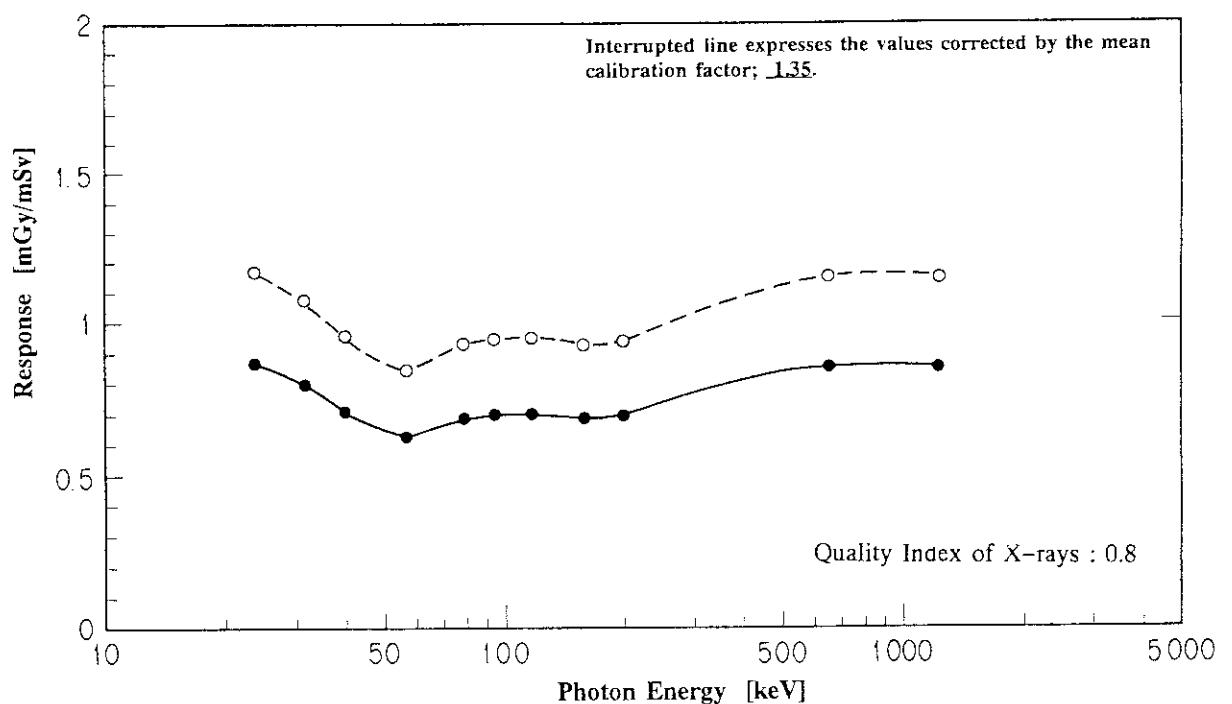


Fig.33 Energy Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for Photons on Exposure

Fig.34 Energy Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for Photons on Ambient Dose Equivalent $H^*(10)$

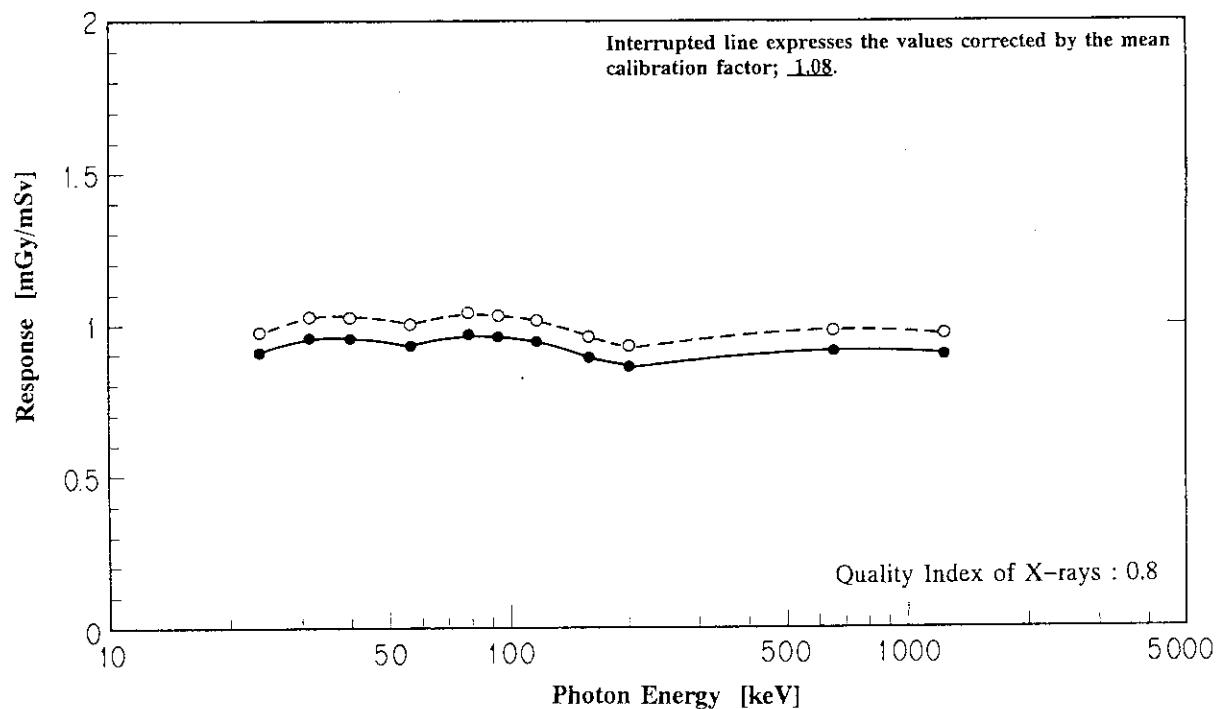


Fig.35 Energy Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for photons on Personal Dose Equivalent $H_p(10)$

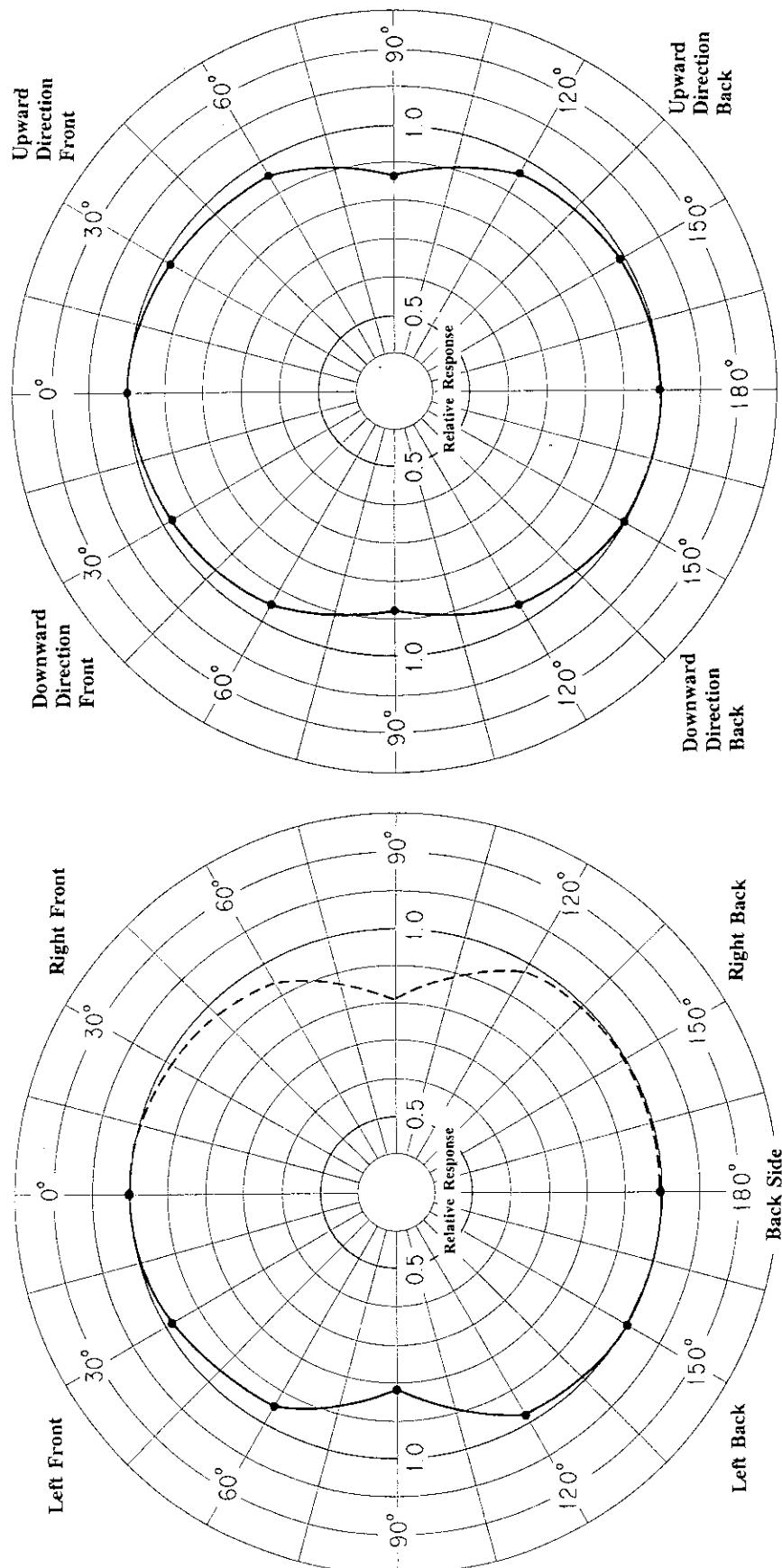


Fig.36 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for ^{137}Cs γ -rays compared with normal condition [Horizontal Variation]

Fig.37 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for ^{137}Cs γ -rays compared with normal condition [Vertical Variation]

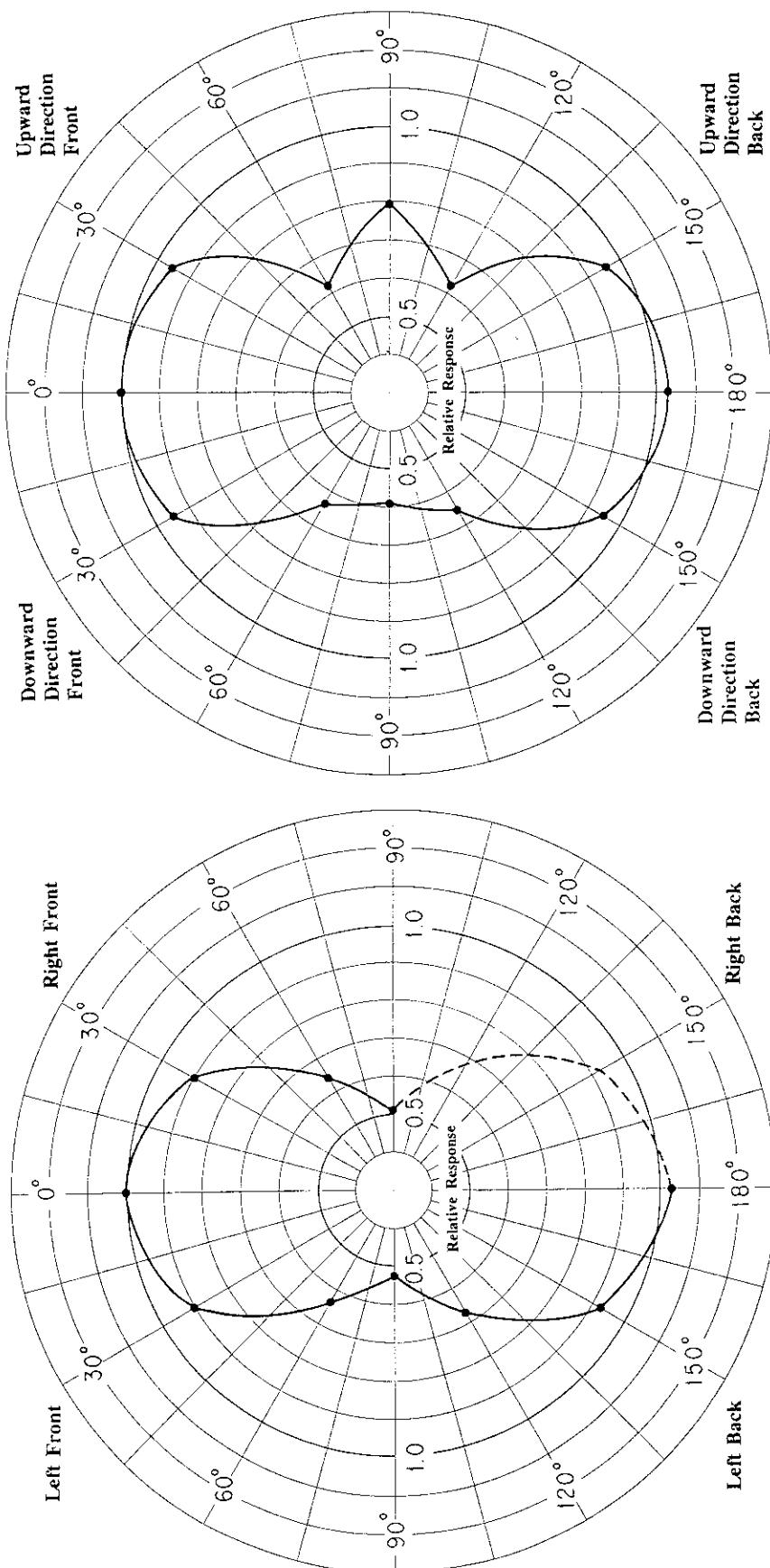


Fig.38 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for X-rays (80 keV) compared with normal condition [Horizontal Variation]

Fig.39 Incident Angle Dependence of Glass Dosimeter Type SC-1 for X-rays (80 keV) compared with normal condition [Vertical Variation]

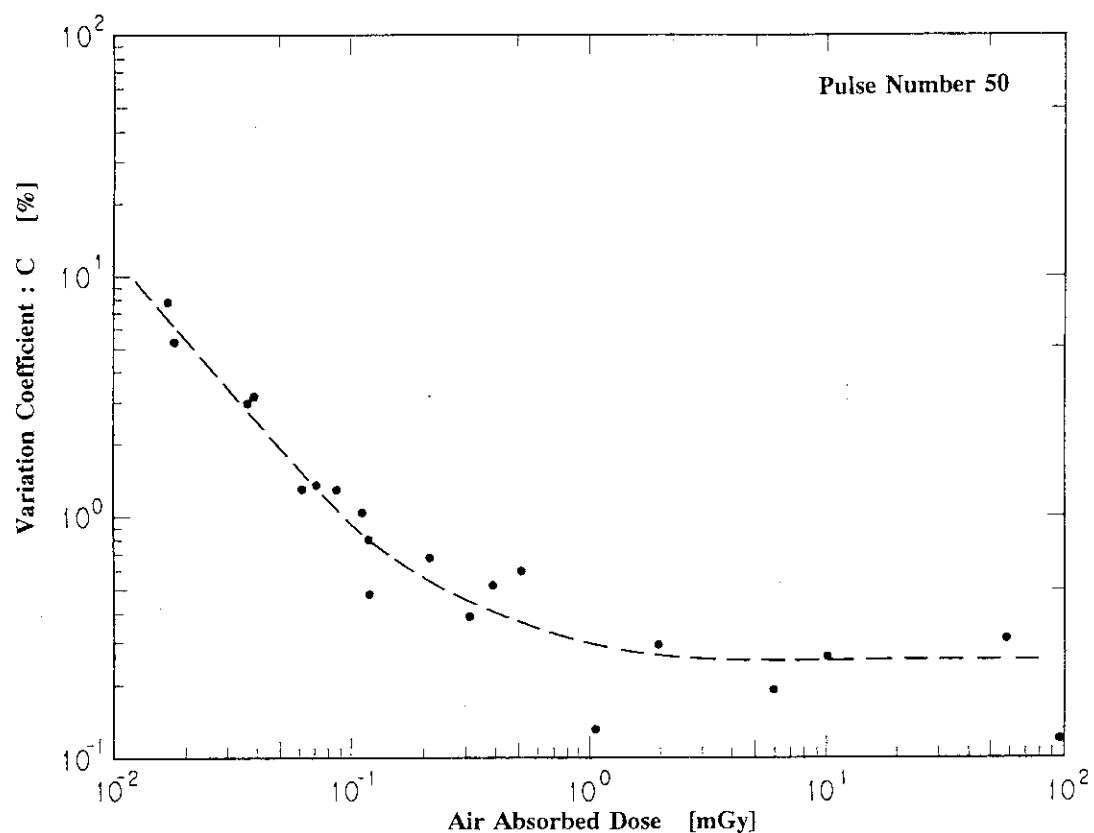


Fig.40 Reproducibility of Glass Dosimeter Readings (Type SC-1)

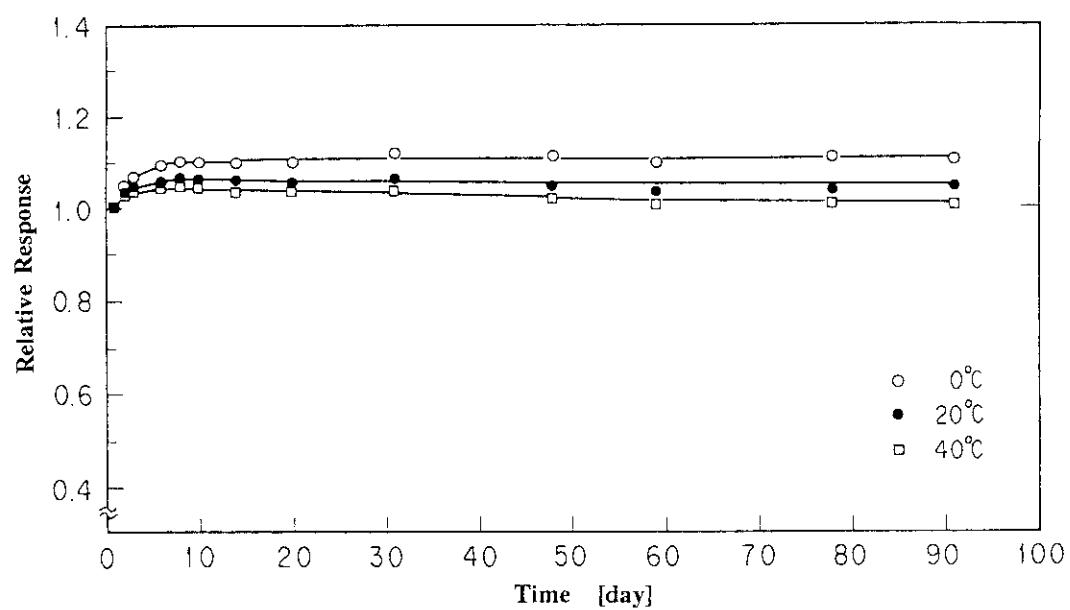


Fig.41 Time Dependence of Glass Dosimeter Readings (Type SC-1)

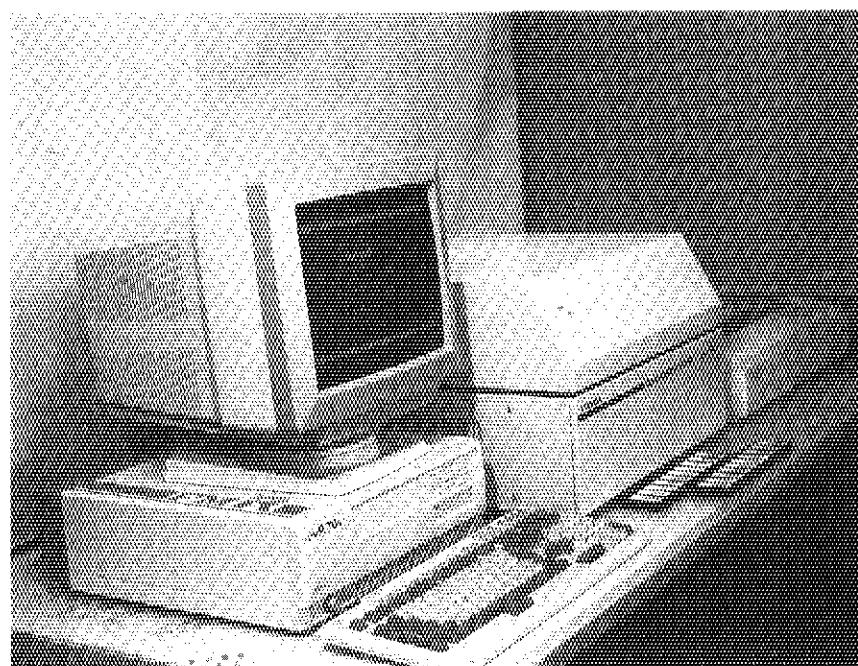


Photo 1 RPL Glass Dosimeter Reader FGD-502

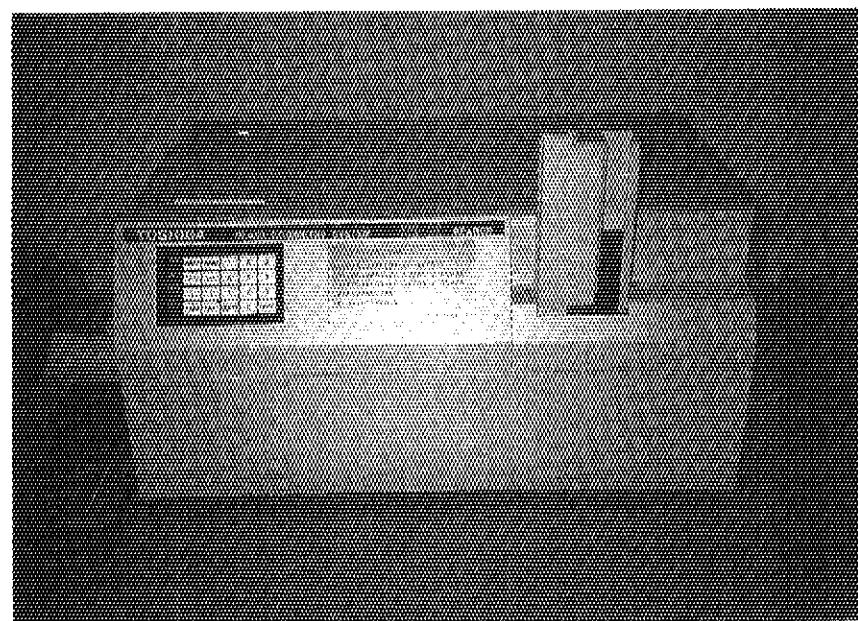


Photo 2 RPL Glass Dosimeter Reader FGD-20