

JAERI-M

5976

コバルト・ガラスによる γ 線の線量測定

1975年2月

中村 義輝・田中 隆一

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

コバルト・ガラスによる γ 線の線量測定

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

中村 義輝 ・ 田中 隆一

(1975年1月16日受理)

コバルト・ガラスを用いた実用的な γ 線量測定法、測定精度、およびそれを γ 線照射施設に応用した結果などについて報告する。放射線着色の fading 効果に対する補正は、吸光度変化の実測値、実験的に決定された fading 定数、照射時間、および照射終了後測定するまでの時間に対する経験式として与えられた。fading に対する温度の影響は0~50℃の温度範囲ではほとんど無視できる。fading 効果の補正式を用いて、線量算出のための経験式がつけられた。この経験式により線量は $10^4 \sim 10^6$ Rの範囲にわたり、約2% (標準偏差)の再現性で決定できることがわかり、その測定精度について検討した。照射済試料は500℃で熱処理することにより十分再使用が可能ながわかった。照射線量分布、深部線量分布への応用例、他の積分型固体線量計との比較、測定の実用的手順などについても述べた。

Gamma Dosimetry by Cobalt Glass

Yoshiteru NAKAMURA and Ryuichi TANAKA

(Pilot Scale Research Station, Takasaki, JAERI)

(Received January 16, 1975)

A reliable method of cobalt glass dosimetry is presented for practical measurements in gamma-irradiation facilities. An empirical formula for the fading correction of radiation-induced coloration is given as a function of the optical density change, fading constant, exposure time and time elapsing between irradiation and read-out. The effect of temperature on the fading rate is negligible between 0°C and 50°C. An empirical equation for dose evaluation, with the correction formula, is developed. The doses can be obtained with good reproducibility ($\pm 2\%$ S.D.) in the range of 10^4 to 10^6 R ; Accuracy of measurements is discussed. The dosimeters irradiated can be re-used by annealing at 500°C. Applications to exposure-rate mapping in radiation field and depth dose measurement, comparison with other solid-state integrating dosimeters and practical procedure of dosimetry are also described.

目 次

1. はじめに	1
2. 実験の方法	1
2.1 試料	1
2.2 測定	2
3. fading 効果とその補正	3
3.1 fading 効果の取り扱い	3
3.2 fading 定数の決定	3
3.3 r 線照射に対する fading 補正	8
4. 線量較正	10
4.1 方法	10
4.2 filtration 効果	11
4.3 結果	11
5. 測定精度について	13
5.1 fading 補正に関する精度	13
5.2 全体の測定精度について	14
6. 照射済試料の再使用	14
6.1 再使用のための熱処理	14
6.2 再融解試料による測定	16
7. 応用例	16
7.1 照射室の空間線量率分布	16
7.2 媒質深部での吸収線量測定	18
8. 大線量測定におけるコバルト・ガラス線量計の特色	20
9. あとがき	21
参考文献	21
Appendix 1. 測定手順の参考例	23
Appendix 2. 減衰係数, エネルギー吸収係数一覧表	25

1. はじめに

放射線化学，食品照射，および放射線殺菌の分野における大線量照射の実用化の進展にともなうて，数多くの2次線量計が開発されてきた。これらは主として多種多様の照射利用の目的に容易に応ずることが先決とされていたため，個々の線量計の信頼性についてはあまり問われなかった。しかし，最近では各照射施設で行っている測定方法および手順が同一でないために，照射の確実性，安全性に支障をきたすおそれが生じてきた。したがって，基準となり得る信頼性の高い線量計に対して，測定法あるいは手順の統一化が要求されるようになってきた。

2次線量計の信頼性が十分でない主要な原因は，大線量測定用として重要な位置を占めるプラスチック線量計や化学線量計が，種々の環境条件（例えば酸素，温度）の影響を受けやすいことや，試料間の再現性が十分確認されていないことである。

現在，これらの難点を最もまぬがれている2次線量計はコバルト・ガラス線量計であると考えられるが，実際には，その諸特性や信頼できる線量算出法が曖昧なままになっており，本来の長所がかならずしも生かされていない。

以上のことを考慮して，われわれはコバルト・ガラス線量計の広範囲の応用を目的として，信頼性の高い実用線量計として必要とされる諸特性を調べ，色々な使用条件下における線量算出法の確立を試みた。本報では，fading効果とその補正法，線量較正，線量算出法，測定精度，照射済試料の熱処理による再使用，実際的応用例について以下に述べる。また，実際に使用するのに便利な線量測定および線量算出手順も付録として載せた。

2. 実験の方法

2.1 試料

コバルト・ガラス試料は小原光学製のもので，大きさは，厚さ1.5 mm，幅13.5 mm，長さ45 mm（製品番号DC-315）である。他に低線量測定用としての厚さ5 mmのもの（DC-310）があるが，本実験では高線量測定を主眼としているので，前者のみに限った。

線量測定に必要な物理的な測定値，およびガラスの組成から重量荷重平均として計算された物理定数は以下の通りである。

密度（20枚の平均）	2.53 g/cm ³
厚さ（ " ）	1.494 ± 0.008 mm
照射前透過率	89.1 ± 0.04 %
質量エネルギー吸収係数（ ⁶⁰ Co- γ ）	0.0264 cm ² /g
質量減衰係数（ ⁶⁰ Co- γ ）	0.0564 cm ² /g
実効原子番号（ \bar{Z} ）	10.0
実効Z/A（ \bar{Z}/\bar{A} ）	0.494

種々の photon エネルギーに対する質量エネルギー吸収係数，質量減衰係数，および吸収線

量評価に必要な空気や水に対する質量エネルギー吸収係数比は Appendix 2¹¹⁾ の Table にまとめて示した。実効原子番号が普通の窓ガラスよりも小さいが、このことは Co-60 などの γ 線による水等価 ($\bar{Z} = 7.2$) な媒質中の吸収線量測定にとって比較的都合である。照射前透過率は試料間でほとんどばらつきはなく、照射による吸光度変化の測定に際して、照射前に各試料毎の吸光度を測定する必要はほとんどない。

2.2 測定

吸光度の測定には日立分光光度計 EPU-139 型および付属のデジタルリーダーを用いた。ただし吸光スペクトルを全体的に見る場合には日立自記分光光度計 S 2 型を用いた。放射線照射により生ずる着色は巾広いスペクトルをもっているため、スリット巾を 0.5 mm 程度に広くとり、分光計の安定な増幅領域を使用した。350 nm, 400 nm, 450 nm の各波長における吸光度変化と線量との大体的な関係を Fig. 1 に示す。線量測定のための最適の波長を線状する場合、感度が高いことと同時に、

広い線量範囲の測定が可能であることが望ましい条件である。450 nm は感度不足であり、350 nm では逆に高線量側が測定限界を越えてしまう。ここでは高い線量すなわち 10^6 R 程度まで測れるという条件を優先させたので 400 nm が最適である。したがって以下の実験はすべて 400 nm の固定波長で行なった。

fading 定数決定のための高線量率の短時間照射には、高崎研究所の Cockcroft-Walton 型電子加速器を用いた。 γ 線照射には、主として約 86 KCi と 61 KCi の ^{60}Co 板状線源を用い、特に低線量領域での fading 効果の測定には 4 KCi の ^{137}Cs 円筒状線源を用いた。線量校正、および再使用のための熱処理法についてはそれぞれの項目で述べる。

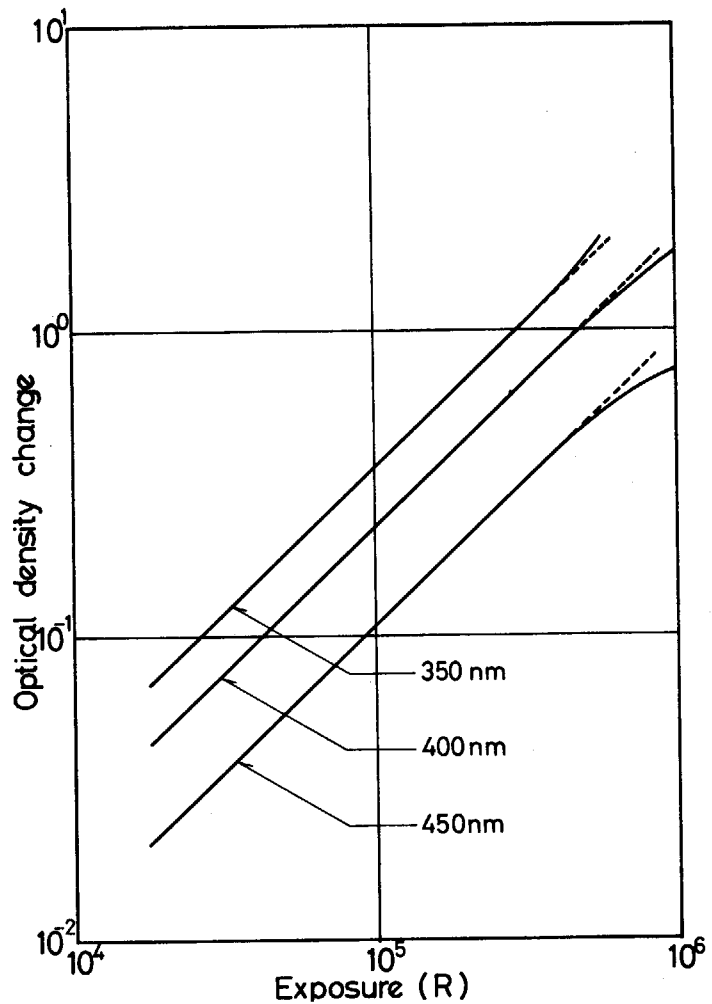


Fig. 1 Optical density change of cobalt glass with exposure.

3. fading 効果とその補正

3.1 fading 効果の取り扱い

一般に無機ガラスの放射線着色の fading では、照射後 t 時間後における放射線により生じた吸光度変化 $A(t)$ は、

$$A(t) \propto t^{-\lambda} \quad (1)$$

の関係が成り立つ。ここで λ は fading 定数である。この関係は、最初 Rabin and Brice¹⁾ が銀活性ガラスに対して見出し、つづいて Kondo²⁾ が普通の窓ガラスに対しても成り立つことを見出した。一方、Kreidl³⁾⁴⁾ らは sodalime-silicate ガラスにコバルトを少量添加したコバルト・ガラスでは fading 定数が非常に小さく、大線量測定に有用であることを見出した。横田ら⁵⁾ はコバルト・ガラス（東芝製）が時間の対数に比例して減少していくことを見出した。また小野ら⁶⁾ はコバルト・ガラス（小原光学製）の fading に対して (1) 式を適用し、fading 定数を求めた。横田らの近似法は測定の厳密さが要求される場合十分正確とは言えず、かつ横田らおよび小野らの方法では、照射時間 τ は無視されるか、あるいは τ は t より十分小さいことを前提としているという問題がある。さらに広い範囲の実用的見地からは、fading 定数の温度依存性と線量依存性を明確にしておく必要もある。

3.2 fading 定数の決定

fading 定数の決定には上に述べたことを考慮し、照射時間の効果が無視できるように、高い線量率が得られる電子加速器による照射を行なった。電子エネルギーは 2.0 MeV、平均線量率は約 $0.2 \sim 2 \times 10^5$ rad/sec であった。コバルト・ガラス 1.5 mm の厚さの中で吸収線量分布ができるだけ均一になるように 0.5 mm のアルミニウム板で両面を蔽って照射した。fading 定数 λ に対する電子線のエネルギー依存性、線量率依存性はないとみなした。2.5 MeV と 1 MeV の電子線照射では fading 定数は変化しないことが実験的にも確かめられた。

fading 定数は 2°C、25°C、50°C、100°C、200°C、400°C の各温度で行ない、線量は吸光度変化が 0.1、0.2、0.5、1.0 付近になるような値を選んだ。400°C では fading が急速であり、照射後短時間で測定はガラスの温度が 400°C に達するのに時間がかかるため不可能であった。したがって、fading 定数は 20 h 以上経過した後の測定から決定された。25°C、400°C の場合の fading 測定の結果を、log-log プロットで Fig.2 に示す。いずれの場合も (1) 式に示した通りの直線関係が成立している。400°C での plot がばらついてるのは、未照射ガラスとの吸光度差が 0.1 以下で測定しているため、 λ の決定精度が良くないことに原因していると思われる。

照射後 t 時間経たときの照射前との吸光度差 $A(t)$ を、

$$A(t) = A_e \cdot t^{-\lambda} \quad (2)$$

とおくと、fading 定数 λ は温度や線量の関数として実験的に決定できる。ここで定数 A_e は、

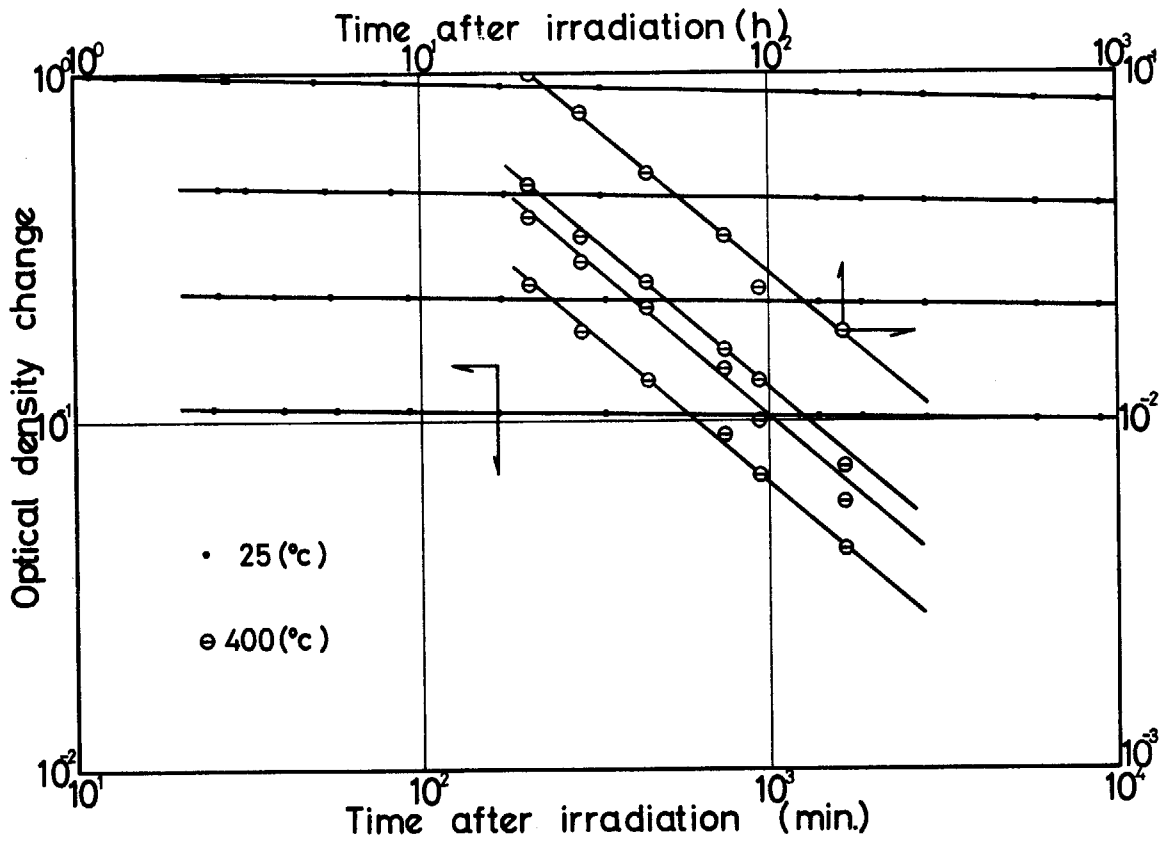


Fig.2 Fading of cobalt glass at 25°C and at 400°C.

Table 1

Fading constant					
Ae	λ	σ	Ae	λ	σ
2 °c			100 °c		
0.124	0.0116	0.00088	0.107	0.0187	0.0010
.216	.0152	.0015	.227	.0214	.0026
.417	.0181	.0013	.400	.0263	.0036
.889	.0232	.0054	.858	.0352	.0096
25 °c			200 °c		
0.107	0.0166	0.00029	0.092	0.0249	0.00077
.230	.0159	.0024	.183	.0271	.0024
.460	.0192	.0012	.355	.0346	.0086
.950	.0268	.0013	.730	.0391	.0063
50 °c			400 °c		
0.114	0.0166	0.0010	0.309	0.832	0.0022
.236	.0186	.0010	.551	.872	.0027
.422	.0212	.0013	.653	.868	.0014
.906	.0292	.0056	1.204	.825	.0094

σ : Standard deviation

$A(1) = A_e$ であるから、照射後1時間経過後の吸光度と照射前のそれとの差である。(1)式のような fading では、 $t \rightarrow 0$ で $A(t) \rightarrow \infty$ となるので他の吸光度測定法による線量測定の場合のような、なんらかの基準になる吸光度変化がない。したがって照射後単位時間経過後の値を線量と対比するときの基準値にせざるを得ない。すなわち、ここでいう fading 補正とは、実測された $A(t)$ から A_e を求めることである。

λ は Fig. 2 に示す直線の勾配として、一連の吸光度実測値から最小二乗法によって決定された。Table 1 に温度をパラメータとして種々の A_e に対する λ 、およびそれらの値をもとにして得られる(2)式と吸光度実測値の間の相対的な標準偏差 σ を示す。Fig. 3 に A_e をパラメータにしたときの λ と温度との関係を示す。横軸の温度に対する勾配から fading の温度係数 k が決定できる。これからわかることは、同じ温度でも λ は A_e に依存するが、 k は A_e には依存しないことである。Fig. 3 から温度係数 k は 0.0038 となったが、この値は Kondo²⁾ が一般の窓ガラスに対して得た値 0.03 よりも約 1桁小さい。 λ と T (°C) との関係は以上のことから次式で与えられる。

$$\lambda = \exp(0.0038T - \ell) \quad (3)$$

ここで、 ℓ は A_e のみの関数として実験的に与えることができる。Table 1 から得られた ℓ と A_e の関係を Fig. 4 に示す。 A_e が 0 から 1 の實際上使用頻度の高い間でほぼ直線関係にあると見なせば、(3)式は次のように経験式化できる。

$$\lambda = \exp(0.0038T + 0.81A_e - 4.44) \quad (4)$$

実際の線量測定では、 A_e はむしろ求めるべき値であって実測されているのは $A(t)$ である。そのため、(4)式の A_e の代わりに $A(t)$ を用いた実用式

$$\lambda = \exp(0.0038T + 0.81A(t) - 4.44) \quad (5)$$

の妥当性を検討した。室温条件のもとで、 $A_e \approx 1.0$ 、 $t = 100$ h の極端な例について計算してみると、 $A(t)$ は約 10% 減少して 0.91 になるが、この値を用いて(2)式によって $A(t)$ から A_e を計算するときの誤差は約 0.5% である。したがって一般的な測定条件では、 A_e を $A(t)$ に置き換えることによる誤差は無視できることがわかる。

次に温度をパラメータにしたときの λ と A_e との関係を Fig. 5 に示す。 λ は A_e とともにだいたい直線的に増加していくことがわかる。25°C と 2°C での測定点がはらついているのは、低温での fading が小さいので決定精度が悪くなるためであろう。特に最も使用頻度の高い常温(25°C)付近での λ は、(5)式とは別に Fig. 5 から次の簡便な実用的経験式を得ることができる。

$$\lambda = 0.015A(t) + 0.0127 \quad (6)$$

前述のように fading の温度係数は小さいので、25°C から ±20°C 程度ずれても、(6)式をそのまま用いることによる誤差はほとんど無視できる。

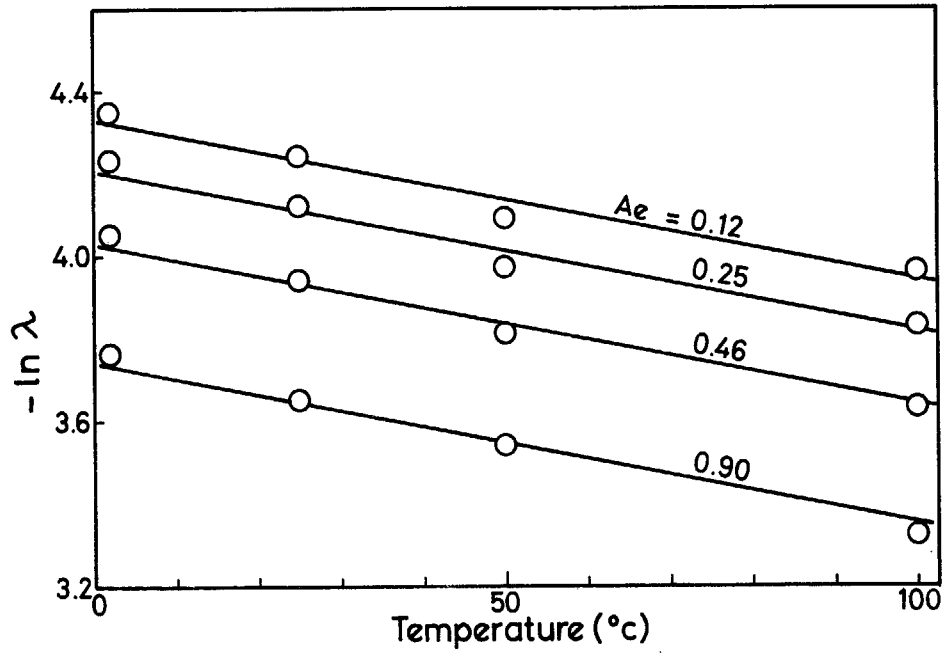


Fig.3 Relationship between fading constant λ and temperature.

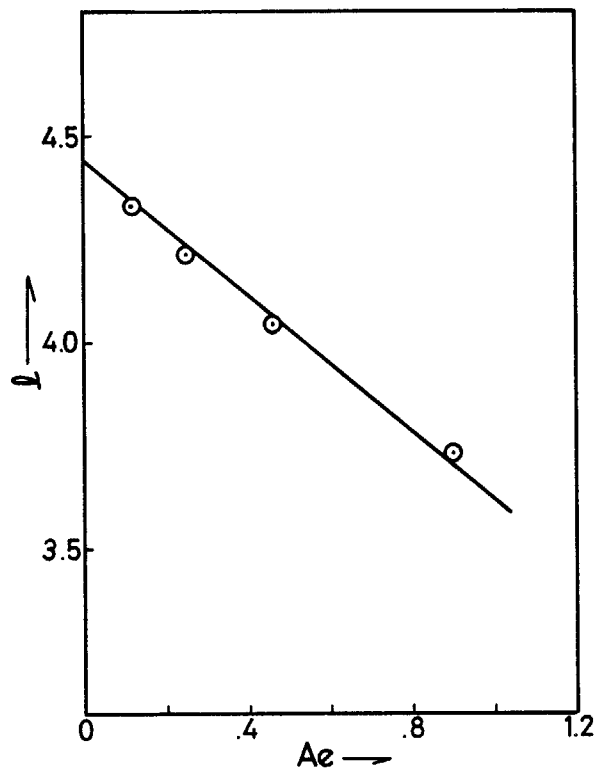


Fig.4 Relationship between constant λ given in (3) and corrected optical density change A_e .

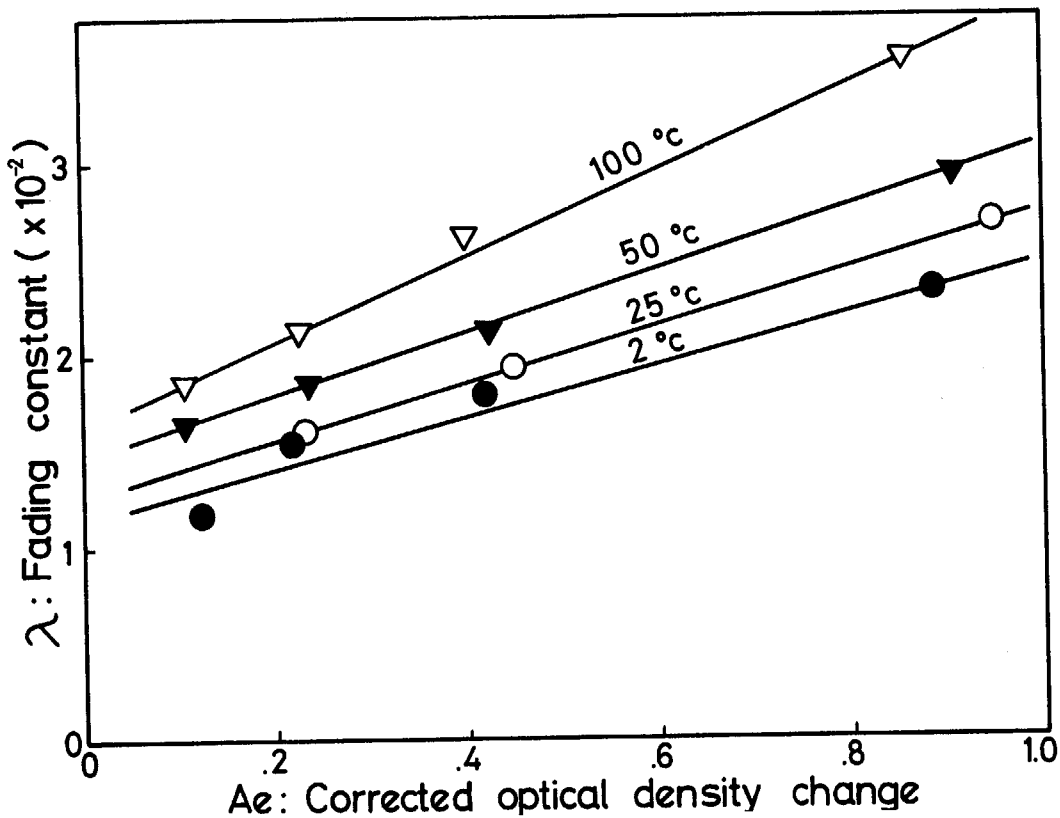


Fig.5 Relationship between fading constant λ and corrected optical density change A_e .

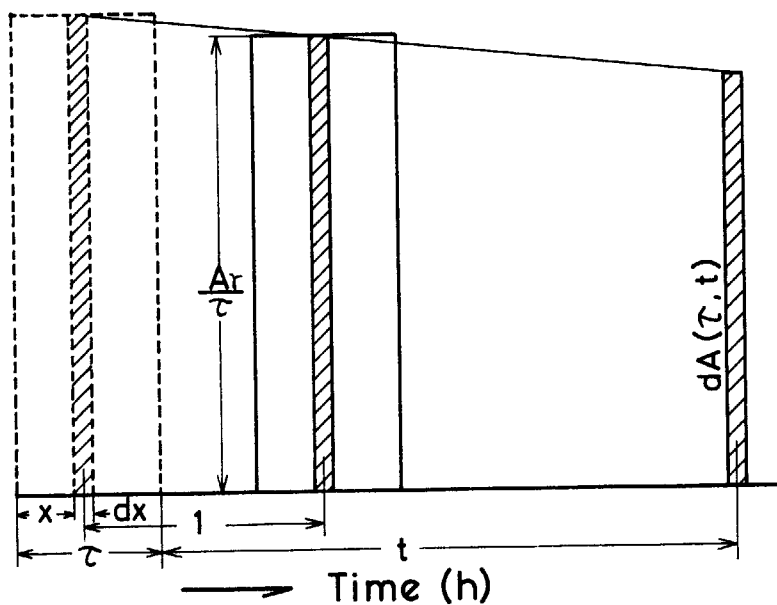


Fig.6 Schematic diagram of fading. (see equation (7))

3.3 γ 線照射への適用

fading 定数の決定には照射時間 τ は照射後測定するまでの時間 t に比べて無視できるほど小さいと仮定している。したがって照射時間の長い γ 線照射に対しては、照射中の fading 効果を考慮する必要がある。実測により得られる照射前との吸光度差 $A(\tau, t)$ は Fig.6 に示すように、照射開始から一定線量率のもとで、 x 時間後の dx 幅の吸光度変化が受ける fading を、全照射時間にわたって積分したものとみなせる。したがって次の計算式として表わせる。

$$A(\tau, t) = \int_0^{\tau} \frac{A_{\gamma}}{\tau} (\tau + t - x)^{-\lambda} dx \quad (7)$$

ここで、 A_{γ} は 3.2 で述べた電子線照射の場合の A_e に相当するが、一般に τ が大きいために A_e のように実測可能な値ではない。照射開始後 λ が吸光度とともに増加していくので、 x 時間後 ($x < \tau$) における λ は (6) 式との対応から、

$$\lambda = 0.015 \frac{A(\tau, t)}{\tau} \cdot x + 0.0127 \quad (8)$$

で与えられる。しかしこのままでは λ が x の関数になるので、(7) 式の計算が面倒になる。したがって、 $x = 0$ から $x = \tau$ までの λ の平均値、すなわち

$$\bar{\lambda} = 0.0075 A(\tau, t) + 0.0127 \quad (9)$$

を γ 線に対する fading 定数として採用した。この結果 (7) 式の積分は簡単になり、

$$A(\tau, t) = \frac{A_{\gamma}}{(1-\bar{\lambda}) \cdot \tau} \{ (\tau+t)^{1-\bar{\lambda}} - t^{1-\bar{\lambda}} \} \quad (10)$$

と書き換えられる。(10) 式による計算結果は (8) 式をそのまま用いた数値積分による結果とは $\tau = 1000$ h, $t = 500$ h, $A(\tau, t) = 1.6$ という極端な例でも 1% 以内で一致しているので、一般の測定条件下ではほとんど無視できる。

以上から補正された吸光度変化量 A_{γ} は次式で与えられる。

$$A_{\gamma} = A(\tau, t) \cdot f \quad (11)$$

$$f = (1-\bar{\lambda}) \cdot \tau \cdot \{ (\tau+t)^{1-\bar{\lambda}} - t^{1-\bar{\lambda}} \}^{-1} \quad (12)$$

ここで f を fading 補正因子とよぶ。 $t \gg \tau$, $\tau \gg t$ の場合に対しては次の近似式が (12) 式から導かれる。

$$f = t^{\bar{\lambda}} \quad (13)$$

$$f = (1-\bar{\lambda}) \tau^{\bar{\lambda}} \quad (14)$$

Fig.7 は (12) 式の大体の性格を図で見やすくしたものである。 $\tau - t$ 座標面内での $f = 0.98, 1.02, 1.06, 1.10$ の等高線が、 $A(\tau, t) = 0.2$ と 0.8 に対して示されている。このグラフから任意の $\tau, t, A(\tau, t)$ に対する補正因子のだいたいの値を知ることができる。 A_{γ} は A_e と

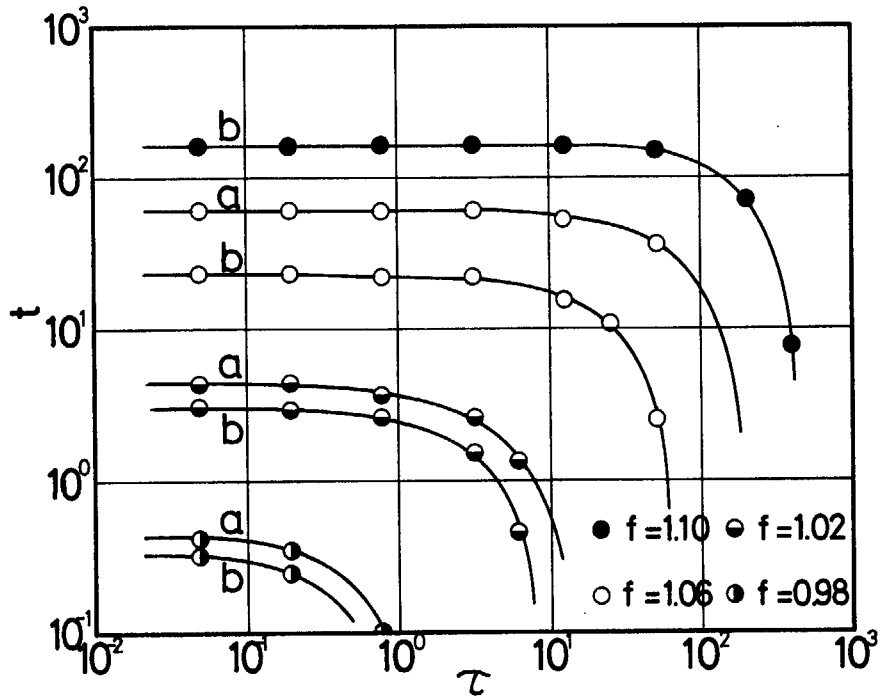


Fig.7 Contour lines of fading correction factor in the plane which contains τ - t coordinate axes.
 (a: $A(\tau, t)=0.2$, b: $A(\tau, t)=0.8$)

Table 2

The effect of irradiation time on fading correction.

($\tau \gg t, t=0.5h$)

τ (h)	$A(\tau, t)$	f	$A\gamma$	Dose ($10^4 R$)	Dose rate ($10^4 R/h$)
5	0.0267	1.012	0.0270	1.12	0.224
21	.113	1.029	.116	4.81	.229
29	.151	1.034	.156	6.47	.223
44	.223	1.041	.232	9.63	.219
51.5	.262	1.044	.274	11.4	.221
75	.373	1.053	.393	16.6	.221
91.5	.436	1.058	.461	20.0	.220
163.6	.705	1.076	.759	36.6	.224

同様に照射後1時間後の吸光度を基準にしているので、 τ 、 t が小さいときは f は1より小さくなる。しかし、 $2h > (\tau, t) > 20\text{min}$ 、 $0.8 > A(\tau, t) > 0.2$ という最も利用度の高い領域ではその補正量は±2%以下である。したがって±5~10%程度の再現性を要求する程度の測定に対しては、fading補正はごく特殊条件下でないかぎり不必要である。

ところで、(9)式は $\tau < t$ の実験条件下で得られたデータをもとにしているので、 $\tau < t$ に対して十分適用可能かどうか実験的に確かめてみた。 $t \approx 0.5\text{h}$ の一定条件で、 $\tau = 5 \sim 160\text{h}$ の広い範囲にわたって同じ線量率を与える照射位置で、 ^{137}Cs 線源による低線量率の照射を行ない、fading補正により A_γ を求め、4.で述べる線量校正曲線を用いて線量率を逆算した。その結果Table 2に示すように、線量率の値は±2%以内で一致していることが確かめられた。±2%のばらつきの中に入射 γ 線の強度のバラツキも含まれていることを考えると、これは良い一致といえる。このことは広い範囲の τ に対する補正が十分妥当であること、およびコバルト・ガラス線量計が、 10^4R/h 程度の低い線量率でも十分使用できることを示している。

4. 線 量 較 正

4.1 方 法

2次線量測定用の固体線量計は本来吸収線量の測定法とされており、フリッケ線量計によって校正する機会が多いが、高線量率では信頼できる校正が行ないにくいので、電離箱によって照射線量の単位で校正を行なった。方法は、 ^{60}Co 線源からある定まった距離をもついくつかの固定点での照射線量率を電離箱で測定し、同じ位置にコバルト・ガラスを置いて、照射時間により照射量を決定した。

電離箱は高崎研究所の大線量測定の標準として使用している0.35ccの平行平板型電離箱⁷⁾を使用した。この電離箱はあらかじめ電子技術総合研究所の標準電離箱(62.5cc)によって $10^3 \sim 10^4\text{R/h}$ の間で校正を行なった。コバルト・ガラスの照射には4.2で述べるfiltration効果を考慮して3枚の試料を重ねたものを使用し、真中のガラスの測定結果に対して校正を行なった。試料中の γ 線の強度減衰を考慮した実効の照射線量 X_e は、同じ位置での試料がないときの照射線量率 \dot{X} を用いて、

$$X_e = f_a^{-1} \cdot \dot{X} \cdot \tau \quad (15)$$

で与えられる。ここで f_a は平均減衰補正係数、 τ は実効照射時間である。本実験ではコバルト・ガラス1.5枚分($0.564\text{cm}^2/\text{g}$)が減衰補正の対象となるが、一次線のみによる二次電子のビルドアップを考慮すると、これによる実効減衰分はおそらく1%以下とみなされるので一応1とみなした。

照射の開始、終了時における線源上昇、下降のときに受ける線量の補正(端効果)は、各照射点での線源上昇、下降時の電離電流の積分値を用いて実効照射時間 τ の中に含まれた。

4.2 filtration 効果

γ 線の照射線量の測定には、電子平衡条件を成立させるために、一定厚さ以上の等価な壁が必要である。特に工業照射用の大線源では contaminant electrons (室内に散乱している compton recoil electrons) の filtrationが必要である。散乱 γ 線も全く無視することはできないが、これは非常に低エネルギーの散乱成分を除いて表面近傍の吸収には影響を与えない。

filtrationに必要な壁の厚さを決定するために、コバルト・ガラスの積層を照射し、表面から数枚の相対吸収線量を測定した。Fig.8にその結果を示す。これから明らかなように、表面にあるコバルト・ガラスの吸収線量はそれより深いところで成り立っているゆるやかな一次線の減衰直線部分を、厚さ0に外挿した線量よりも10%程度高くなっている。この値は照射の幾何学的条件にもかなり依存する。contaminant electronsの飛程は、 ^{60}Co γ 線に対して一般に必要なとされている電子平衡距離 ($0.4 \text{ cm}^2/\text{g}$)と同じと考えられるので、filtrationに必要な壁の厚さは、同じコバルト・ガラスを使った場合は1枚分の厚さ ($0.38 \text{ cm}^2/\text{g}$)にほとんど等しい。したがって空気中の照射線量の測定には、測定用の試料の両側を他の使いふるしの試料2枚で前後にはさんだものを照射に使用した。

4.3 結 果

Fig.9に以上の結果得られた400nmでの A_γ と照射線量との関係を示す。横軸は(15)式から得られる実効照射線量である。 $A_\gamma < 0.3$ では A_γ と照射線量の間には正確な比例関係があるが、それ以上では徐々に飽和傾向が現われてくる。測定可能な線量の下限は主として分光計の測定精度によって決まる。もし0.1付近の吸光度の測定で0.001の不確定さがあるとするならば、照射による吸光度変化0.05に対する測定誤差は、約1%となる。したがって $1 \times 10^4 \text{ R}$ の測定に対して約4%の精度が得られる結果になる。 $A_\gamma > 0.3$ (約 $1.2 \times 10^5 \text{ R}$ に相当)の非直線的応答の領域に対しては、 10^6 R まで適用できるように、最小2乗法による多項式近似の経験式を作製した。

以上の結果から、実効照射線量 X_e と A_e との関係として次の経験式が採用された。

$$X_e = 4.15 \times 10^5 \cdot A_\gamma \quad (A_\gamma \leq 0.3) \quad (16)$$

$$X_e = (1.58 \cdot A_\gamma^3 - 1.45 \cdot A_\gamma^2 + 5.34 \cdot A_\gamma - 0.268) \times 10^5 \quad (1.5 > A_\gamma > 0.3) \quad (17)$$

(16),(17)式の各係数は、種々の照射線量率のもとで得られたFig.9に示す各プロットをもとに決定した。(17)式は3次式より高次でほとんど近似精度の増加はみられなかった。両式からの実験値の相対的標準偏差は $1.5 > A_\gamma > 0.04$ に対して約 $\pm 2\%$ であった。この値は試料自身による感度のばらつき、吸光度の測定誤差、照射位置の再現性、電離箱測定の再現性などの誤差要因を考慮すると、校正に関わる相対誤差としては十分小さく、コバルト・ガラス線量計の再現性の良さを示している。

コバルト・ガラス自身の吸収線量 D_g は、 ^{60}Co γ 線に対しては X_e と次の関係式が成り立つ。

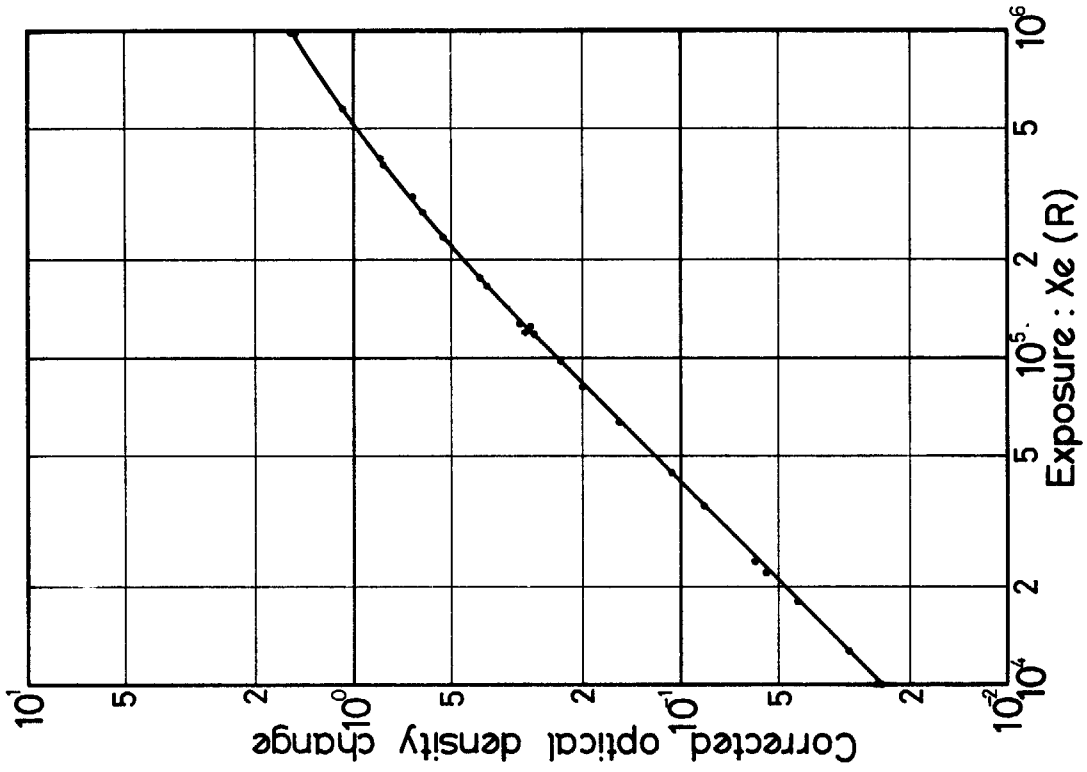


Fig.9 Relationship between corrected optical density change and exposure.

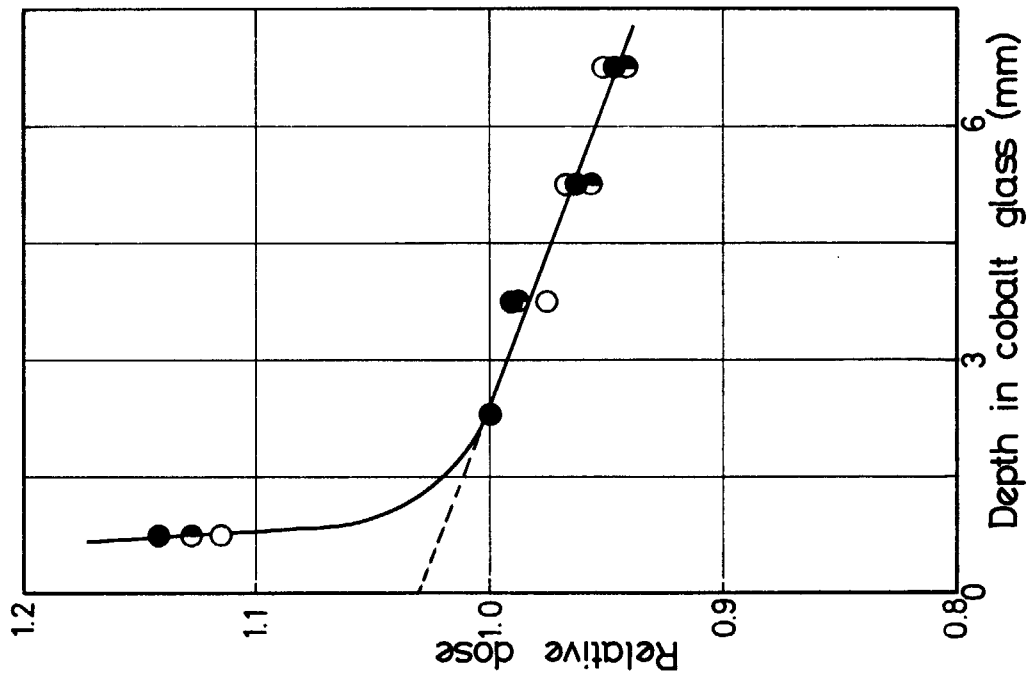


Fig.8 Filtration effect in cobalt glass.

$$D_g = 0.869 \left\{ \frac{(e_n \mu / \rho)_g}{(e_n \mu / \rho)_{air}} \right\} \cdot X_e$$

$$= 0.862 X_e \tag{18}$$

被照射媒質中に直接挿入して、その場合の媒質中の吸収線量 D_m を求めようとする場合は、ここではガラスの質量エネルギー吸収係数に関係なく、

$$D_m = 0.869 \cdot \frac{(e_n \mu / \rho)_m}{(e_n \mu / \rho)_{air}} X_e \tag{19}$$

で与えられる。 $(e_n \mu / \rho)_m$ は媒質の質量エネルギー吸収係数である。コバルト・ガラスはかなり厚いので、媒質との境界面での2次電子の非平衡による効果は、スズや鉛などの重原子番号の媒質を除けばほとんど無視できる。

5. 測定精度について

5.1 fading 補正に関する精度

fading 補正係数は τ , t , T , (λ) の関数であるので、これらの各パラメータの誤差が fading 補正係数 f の算定にいかに関与するかについて簡単に調べた。各パラメータを全て変数としてあつかうのは実際上面倒なので、 $t = 0.5 \text{ h}$, $A_\gamma = 0.4$, および $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ の標準的条件を仮定し、このとき $\Delta f = (\partial f / \partial \lambda) \Delta \lambda$, $(\partial f / \partial t) \Delta t$, $(\partial f / \partial T) \Delta T$ を種々の τ について計算した。 $\Delta \lambda$, Δt , ΔT は各パラメータの取り得る最大誤差とする。いま、 $\Delta \lambda / \lambda = 0.2$, $\Delta t / t = 0.25$, $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ としたとき、 $\Delta f / f \times 100 (\%)$ と τ の関係を Fig.10 に示す。このグラフから、一般に τ が増加するほど f の誤差は大きくなるのがわかる。しかし、

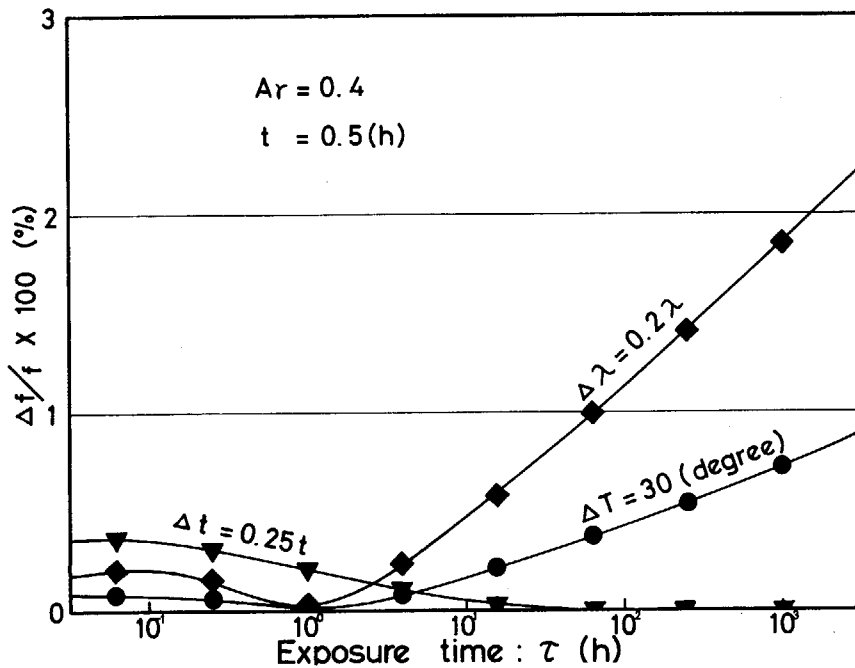


Fig.10 The relation between the accuracy of fading correction factor and exposure time.

$t < 10$ h の一般的条件では誤差はほとんど無視できる。温度は 30°C 変化しても誤差はわずかなので、 $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ の常温付近の照射条件、および照射後の保存条件のもとでは、温度の効果はほとんど無視できる。(12)式を導く過程での近似による誤差は、上に述べた標準的条件のもとでは問題にならない。しかし $A_{\gamma} \approx 1$ 程度の大きな吸光度変化に対しては、 λ の実測値の信頼性が高くなるとはいえ、fading 補正の誤差は大きくなると考えられる。

5.2 全体の測定誤差について

2次線量計の測定精度は、いくつかの試料間の感度のバラツキ、あるいは再現性として単純に実験的に与えられることが多いが、これらの値は全体的な測定精度に比べるとかなり低い値を示す。実際の測定において誤差要因をすべて考慮した全体的精度を厳密に評価することは極めて難しい。したがって、ここではコバルト・ガラスによって吸収線量測定を行なう場合の全体的誤差を、各要因による誤差の二乗和の平方根で近似し、ごく概算的な精度を評価してみた。ただし各誤差要因の数値評価はある程度曖昧さを含んだものとしてあつていている。 $A_{\gamma} \approx 0.3$ の標準的な測定条件を想定すると、電離箱測定による絶対誤差2%、線量較正に関わる誤差2%、分光計の測定誤差1%、fading 補正に関わる誤差1%、試料の厚さのバラツキによる誤差1%、吸収線量算出に関する誤差1%と概算すると、全体の誤差は3.5%になる。試料自身の感度のばらつきによる誤差、および6.1で述べる熱処理によるわずかの感度のバラツキの増加などを含めると、この値はさらに多少増加すると思われる。線量較正を行なったあとも、コバルト・ガラスと電離箱によつて、数回にわたり照射線量の比較測定が行なわれているが、その結果広い線量率領域にわたり、3%以内の一致が見出されている。これには電離箱の絶対誤差が含まれていないことを考慮しても、上の誤差評価がおおよそ妥当であることを示している。

6. 照射済試料の再使用

6.1 再使用のための熱処理

ガラスの fading 定数は保存温度が高くなる程大きくなることを利用して、高温熱処理による完全な fading によって、線量計としての再使用の可能性を検討した。高温での実験の結果、(3)式は 200°C まで成り立つことがわかっているが、 400°C での fading は、Table 1 に示すように、(3)式をもとにした計算よりもはるかに急速であった。このため 400°C 以上での λ の測定は実際困難であった。したがって、 λ の実測とは別に、コバルト・ガラスのガラス転移点 (575°C) を越えないような適当な温度として 500°C を選び、広い波長領域にわたって吸光度の変化を調べた。熱処理は円筒型電気炉を用いた。Fig.11 は照射による着色の過程と熱処理による fading の過程を $340\text{ nm} \sim 470\text{ nm}$ の間の吸収スペクトルの変化として示したものである。これから両方の過程は吸収スペクトルの変化に関して可逆的であり、 γ 線照射により導入された吸収は熱処理によって完全に消去できることがわかった。

さらに再使用のための信頼性を確認するため、 500°C での照射と熱処理の繰り返し効果も調べた。Table 3 は照射と熱処理の過程を5回繰り返したときの各線量に対する、吸光度変

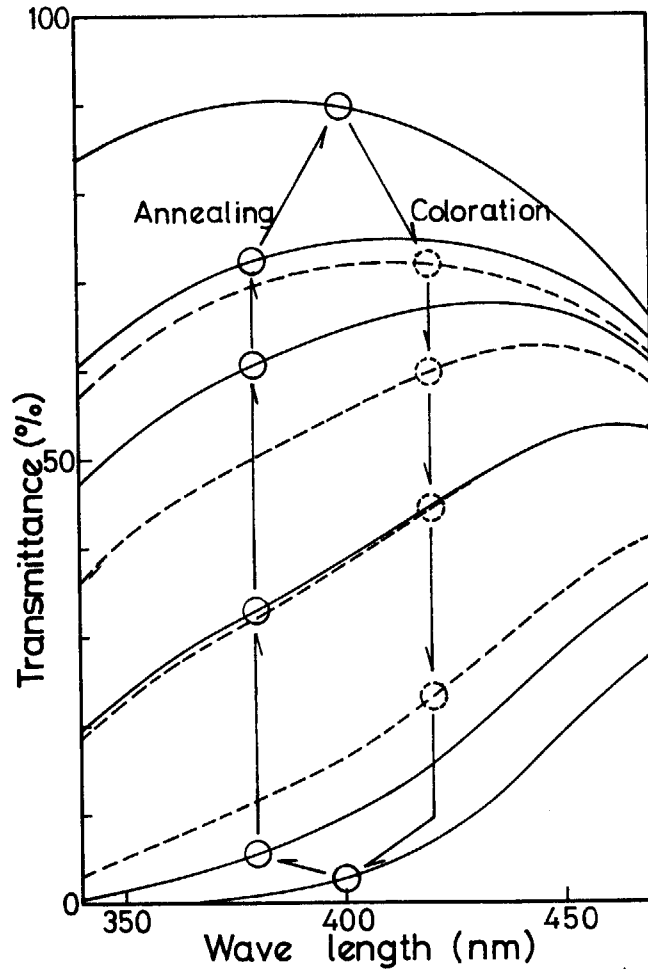


Fig.11 The effect of coloration and annealing on the absorption spectrum of cobalt glass.

Table 3
The effect of repeated annealings (500°C).

Exposure (MR)	Not annealed	(1) 22h	(2) 22h	(3) 22h	(4) 46h
~ 1	1.53	1.53	1.52	1.54	1.53
	1.53	1.54	1.53	1.54	1.54
~ 0.5	1.020	1.029	1.031	1.020	1.022
	1.021	1.027	1.029	1.019	1.014
~ 0.2	0.533	0.530	0.530	0.529	0.527
	.528	.533	.527	.527	.527
~ 0.1	.305	.307	.305	.306	.307
	.305	.312	.304	.304	.303

化をそれぞれ2つの試料について示している。この結果、測定誤差の範囲内で感度の変化はみられず、十分再現性がよいことがわかった。

以上のことから、コバルト・ガラス線量計は500℃で熱処理することにより、繰り返し使用できることがわかった。熱処理時間は500℃ならば大体数時間程度でよいが、電気炉の温度分布の不均一さやその他の便宜を考慮して、電気炉に一昼夜(～20h)放置する方法をとった。

6.2 再融解試料による測定

コバルト・ガラスを500℃以上の温度での影響を調べるために、極端な例として本実験に用いている試料と同一バッチのガラス塊を再融解して作った試料による、照射前の透過率および線量に対する感度のチェックを行ない、通常試料との比較を行なった。

Table 4 に通常試料(未照射試料(a), 熱処理済試料(b), および(a)を再融解した試料(c))の照射前の透過率をそれぞれ試料10枚について測定した結果を示す。(b)の平均吸光度がすこし低い値を示しているのは、数回の熱処理などの取りあつかいの途中で表面が荒れたためと考えられる。しかも平均吸光度の変化は、(c)に対してもほとんど問題にならない。(c)ではバラツキが大きい、これは再融解過程で試料中に気泡が混入し、その分布が一定でなかったことになり原因していると考えられる。

Table 5 は、(a), (b), (c)の各試料について、照射と熱処理の繰り返しの5回行なったときの $\Delta\gamma$ の測定値(5回の平均)を示す。再融解試料のfading定数は通常試料と同じ値を使用した。方法は5つの異なった照射線量率の場所で、それぞれ3種類の試料を一定時間(20分)照射した。(c)に対しても熱処理の繰り返しによる感度の変化は見られなかった。しかし同試料の感度は通常試料(a), (b)よりも約7%程度感度が減少している。再融解の過程が放射線着色機構にいかなる変化をもたらしたかは不明であるが、この感度の変化はバッチ間の感度の再現性がかならずしも、十分保証できないということを示唆している。したがって、バッチ交換ごとに感度やfadingの試験を行なう必要があるものと考えられる。

7. 主な応用例

コバルト・ガラス線量計の長所は再現性がよく、小型で取扱いが簡便であり、かつ再使用も可能なので安価であるという2次線量計の基本条件を満たしていることである。したがって、研究的な測定から照射施設における日常的測定までの広い領域にわたる応用が可能である。応用目的から大別すると照射線量測定と媒質中の吸収線量測定の2つの側面が挙げられる。ここでは主として照射施設の利用の立場から、両者に対する代表的応用例を示す。

7.1 照射室内の空間線量率分布⁸⁾

数千Ci以上の照射用の γ 線源を用いた照射室では、露出した線源の周囲の空間における照射線量率分布を、線源およびそれを含めた周囲の幾何学的条件が変るごとに測定しておかなく

Table 4 Transmittance of pre-irradiated samples.

	Transmittance (%)	Standard deviation
(a) Ordinary samples (Un- irradiated)	89.1	0.04
(b) Ordinary samples (Annealed)	88.9	0.18
(c) Re-melted samples (Un- irradiated)	89.0	0.31

Table 5 The response for ordinary samples and re-melted samples.

Number	Ordinary samples		Re-melted samples
	(a) Un-irradiated	(b) Annealed	(c) Un-irradiated
1	1.488	1.478	1.381
2	0.760	0.746	0.716
3	.390	.401	.369
4	.162	.165	.153
5	.0829	.0822	.0771

てはならない。こうして得られる線量率分布図は、実際の照射において吸収線量算出の基準となるので、十分経験を積んだ信頼性ある方法でなくてはならない。電離箱による測定法はこの目的に適しているように見えるが、面倒な遠隔操作を行なわないと、短時間に多くの点で測定することは不可能である。またフリッケ線量計は通常の方法では高線量率の測定がむずかしいこと、および照射試料が比較的大きいために、線源の方向に直線的に並んだ試料が γ 線をさえぎる効果をおこしやすいことなどの欠点がある。短時間照射で全線量を低くおさえることは、照射の開始、終了時の線源の露出および格納の過程で受ける端効果によって制限される。したがって比較的高線量まで測定可能で、同時に多くの空間点で測定可能であり、かつサイズの小さいコバルト・ガラス線量計が、現在のところ、照射線量率（空間線量率）の分布測定に最も有効である。

Fig.12 は高崎研第5照射室における実測の結果を等線量率分布として示す。線源は61 K Ci の ^{60}Co 板状線源（30 cm（高さ） \times 140 cm（幅））であり、照射台面から線源中心までの高さは約15 cmである。ここに示した分布は、線源中心の高さにおける照射台上での測定結果である。コバルト・ガラスは4.で述べたように3枚重ねてアルミニウム薄板のサンプル支持具に固定して各照射点にセットし、全線量が $2\sim 50 \times 10^4 \text{R}$ 程度になるように照射時間を決定した。なお等線量率分布は計算から求めることも当然可能であるが、散乱線と自己吸収が複雑に寄与するため、正確な計算はむずかしく、現在のところ計算法は実験値よりも信頼性がかなり悪い。

7.2 媒質深部での吸収線量測定

^{60}Co 線源を用いた吸収線量測定において、小さな被照射体あるいは大きな被照射体でも表面付近は、直接 γ 線や低次の散乱 γ 線によるコンプトン吸収が支配的であるので、線量計と媒質との原子番号との相違はほとんど問題にならない。しかし、たとえばジャガイもの照射のような大きな照射用コンテナ深部では、低エネルギー散乱 γ 線の成分が多いと考えられるので、線量計の原子番号の効果があるかどうか調べておく必要がある。

われわれは標準的媒質として水を選び、コバルト・ガラス線量計（ $\bar{Z}=10.0$ ）とフリッケ線量計（水等価 $\bar{Z}=7.2$ ）との感度比が媒質の奥行深さが増すとともに変化するかどうか、簡単な実験を行なってみた。その結果をFig.13に示す。線源は8.1で述べたのと同様の ^{60}Co 板状線源を用い、Fig.13に示す水槽（30 cm（高さ） \times 60 cm（幅） \times 100 cm（奥行））を線源から16 cm離して、被照射体の中心線上に線量計を配置した。線量計としてはコバルト・ガラス、フリッケ線量計以外にもシリコン接合型固体電離箱⁹⁾（ $Z=14$ ）を用いた。3つの線量計から得られる水の吸収線量の直接比較が面倒なので、奥行深さ10 cmの点で線量計のレスポンスが1になるように規格化した。10 cmの点で規格化したのは表面線量は線源に近く、誤差が生じやすいためである。60 cm以上の深さでの結果は低線量率のため測定値が小さく、バラツキが多いので削除した。結果は50 cm付近まで線量減衰の挙動はほとんど一致しており、低エネルギー散乱 γ 線の効果がこの原子番号の範囲では無視できることがわかる。しかし、実験に用いた水槽の幾何学的条件は特殊なものであり、多くの計算のモデルになっている無限媒質や半無限媒質などの場合とは、ビルドアップ係数が異なっていると考えられる。

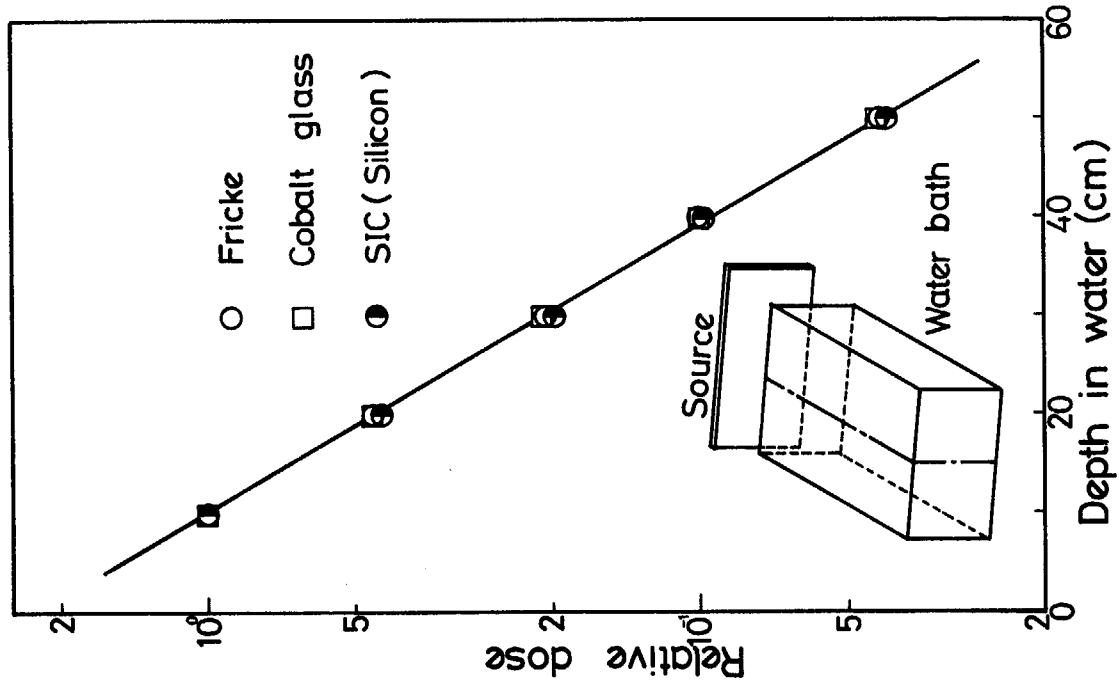


Fig.13 Depth dose distribution in a water bath measured by various dosimeters.

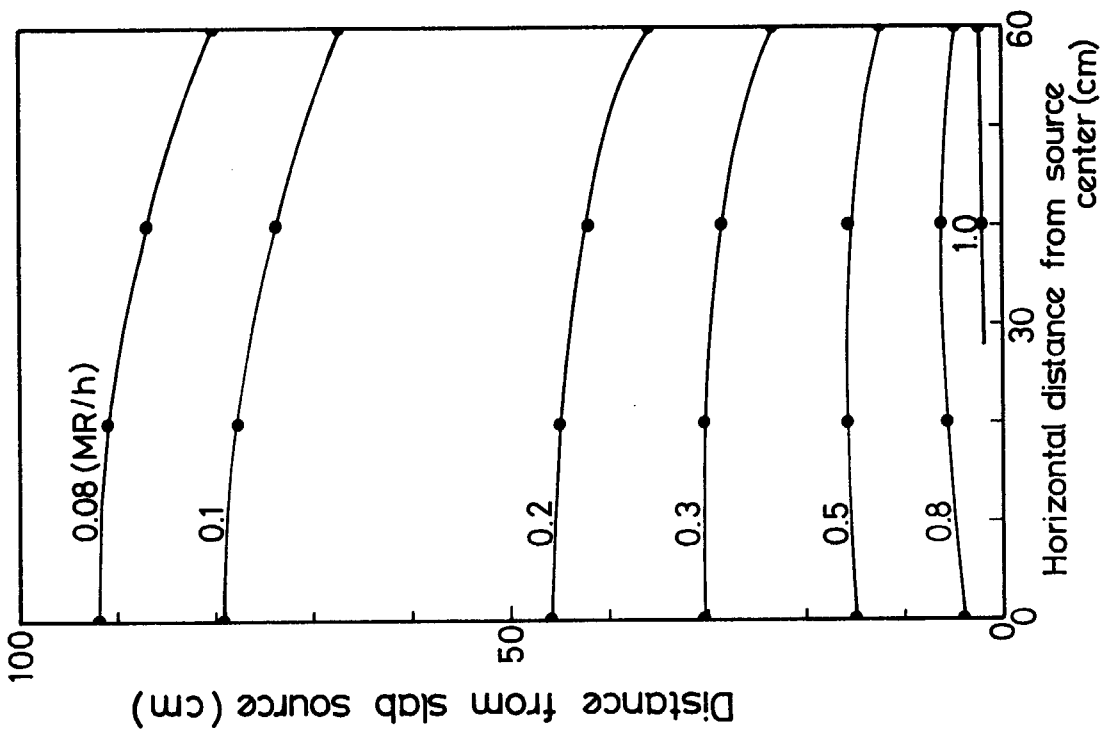


Fig.12 Isodose curve around a slab source measured by cobalt glass dosimeter.

Brnjolfsson¹⁰⁾ は点線源の周囲の無限媒質中での、線源からの距離の増加にともなり線量計の感度に対する散乱線の効果を計算しているが、それによると、フリッケ溶液に対する石英ガラス ($\bar{Z}=10.8$) の感度比が距離とともにかなり増加しており、われわれの実験結果とはかなり相違している。この不一致を幾何学的条件の相違に起因させるには少し大きすぎるように見える。今後、計算結果と容易に比較できるような厳密な実験をする必要がある。

8. 大線量測定におけるコバルト・ガラス線量計の特色

大線量測定に使用されている2次線量計は、それぞれの用途によっても異なるが、多くの条件が要求されている。ここでは当研究所の γ 線照射施設において経験を積んできたいくつかの他の積分型固体線量計(ポリメチルメタクリレート(PMMA)、三酢酸セルロース(CTA)、ブルーセロファン、熱蛍光線量計(TLD))と比べて、コバルト・ガラス線量計がいかなる特色をもっているか、各項目別に簡単にまとめた。ただし、ここに述べる他の線量計については、それらの特性など多くの不明な問題を残しており、まだ改良されるべき余地も含まれている。したがってここに示した判断は確定的なものではなく、過渡的なものである。

1. 線量範囲——プラスチック線量計が主に1 Mrad以上の測定に便利であるが、コバルト・ガラスおよびTLDはそれ以下の領域を対象としている。
2. バッチ内の再現性——再現性の意味は一般に曖昧であるが、コバルト・ガラスは種々の異なった照射条件のもとでも、 $\pm 2\%$ 程度の再現性をもつ。しかし、プラスチック線量計では同時に全く同じ条件で照射した線量計の間では、 $\pm 2\%$ の再現性は期待できたとしても、異なった条件の間では再現性はそれよりかなり悪くなる。コバルト・ガラスは同じバッチから得られる試料の間の感度の均一度は非常によい。他の線量計ではこのことは十分保証されているとは言いがたい。TLDについては、少なくとも大線量測定用の固形試料に対して、現在のところ $\pm 5\%$ 以上の再現性は得られていない。
3. 直線的応答性——コバルト・ガラスはPMMAやCTAと同様、線量に対して直線的応答をする領域があるが、TLD、ブルーセロファンでは直線的応答はみられない。
4. 線量率依存性——CTAやブルーセロファンにみられるような線量率依存性はない。このことは同じ無機質のTLDと同じである。fading補正を行わない場合は見かけ上の線量率依存性があらわれることもあるが、その効果は小さい。
5. fading——PMMA、CTAに比べて少ないばかりでなく、周囲の条件の影響を受けにくいので、その補正は容易である。TLDやブルーセロファンは照射後の安定性はよい。
6. 酸素、温度の効果—— $0^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ の間で温度の効果はほとんど無視できるほど安定であるが、プラスチック線量計ではかなりこの影響を受ける。これらの効果は不純物の効果とも相互に関係し複雑となり、反応機構はあまり解明されていない。TLDは常温付近で使用している限りこれらの効果は無視できる。
7. 価格および繰り返し使用の可能性——TLDと同様試料は高価であるが、コバルト・ガラスは再使用できるので、実質的には欠点とならない。大線量測定におけるTLDの再使用

の可能性はまだ確認していない。プラスチック線量計は一般には再使用できないが、TLDやコバルト・ガラスに比較して安価である。

以上の特色から判断すると、特に線量範囲においてコバルト・ガラス線量計はTLDとかなり競合する面をもっているが、現状ではTLDは個人被曝管理などの低線量領域を主たる対象としており、大線量領域ではまだ信頼性が乏しく、大線量測定に適した測定法はまだ開発されていない。

9. あ と が き

大線量領域の2次線量測定に関しては多くの報告がなされてきたが、従来はどちらかという、限られた目的に対する新しい方法としての興味が先行していたために、広範囲の条件下での応用のため必要な特性が、系統的に調べられる機会が少なかった。そのために線量計としての経験を積んでくるにしたがって、実用的な2次線量計としての必要なデータが不足していることが明らかになってきた。本報告では2次線量計の中でも最も単純なふるまいを示すコバルト・ガラス線量計を、最も信頼のおける γ 線用の2次線量測定法として確立させるために、出来るかぎり広範囲の特性を調べ、それをもとに実用的な線量算出法を決定した。しかしここに示した線量算出式とfading補正式の中の数値は新しいバッチの試料に対しては、おそらくそのまま適用できないと思われる。したがってこれらの数値はバッチ交換ごとに実測によって決定する必要がある。バッチ間の再現性が保たれているか、あるいは保たれていないとしても、それが正しくチェックされているかという面倒な問題は、従来あまり議論されてこなかったが、2次線量計の信頼性にとって欠くことのできない重要な条件であるので、コバルト・ガラス線量計の今後に残された課題として追求していく予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、種々の御援助をいただいた小原光学硝子製造部の方々に感謝します。また電子線照射で便宜を計っていただいた照射施設課の須永博美氏、線量校正の際に基準となる電離箱のデータを提供していただいた河合祝己人氏、さらに報告をまとめる際に御指導いただいた照射施設課長田村直幸氏に感謝します。

References

- 1) H.Rabin and W.E.Price ; *Nucleonics* 13, No 3, 33, (1955)
- 2) S.Kondo ; *J.Phys.Soc.Japan* 13, 224 (1958)
- 3) N.J.Kreidl and J.R.Hensler ; *J.Am.Ceram.Soc.* 38, 423 (1955)
- 4) N.J.Kreidl and G.E.Blair ; *Nucleonics* 14, No 1, 56 (1956)
- 5) 横田, 富島, 清水 ; *東芝レビュー* 13, 1017 (1958)

- 6) S.Ono, S.Hirokawa and H.Nagai ; J.Phys.Soc.Japan 21, 1217 (1966)
- 7) 田中, 四本, 田島, 河合, 水橋, 景山 ; JAERI-M-5608 (1974)
- 8) 田島, 三友, 中村, 河合, 菊地, 他4名 ; JAERI-M-投稿中 (1974)
- 9) R.Tanaka, S.Tajima, and A.Usami ; Intern.J.Appl.Rad.Isotopes.24, 627 (1973)
- 10) A.Brnjolfsson ; Advan.Chem.Ser., 81, 550 (1968)
- 11) E.Storm, and H.I.Israel ; LA-3753 (1967)

Appendix 1.

測定手順の参考例

ここに述べられている手順のうち、fading 補正係数および実効照射線量の算出に用いている数値は、バッチごとに実測して求めるべきものであって、コバルト・ガラス線量計固有の定数ではない。線量較正法も十分確立した方法ではないので、将来もっと正確な較正法によって改められるべきである。

- (1) 試料の番号付けを行なう。(マジックインクなどで)
- (2) 照射前の透過率 T_0 (あるいは吸光度) を測定する。

測定波長は 400 nm を基準としている。照射前透過率は試料間でほとんどばらつきはないので、特に厳密さを要求しない場合は、個々別々に測定する必要はない。本報告では初使用ガラス $T_0 = 89.1\%$ 、再使用ガラス $T_0 = 88.9\%$ としている。

- (3) 線量計をセットし、照射する。

空間の照射線量を測定する場合は、同程度の厚さのガラス(照射済のコバルト・ガラスでよい)2枚でそれぞれ試料の前後をサンドイッチにして、3枚1組とする。吸収線量測定の場合も、媒質内部の吸収線量を知る目的ならば、試料を直接に照射野にさらさないで、 $0.4 \text{ cm}^2/\text{g}$ 以上のコバルト・ガラスと等価なフィルターをつけてセットするのが望ましい。線量に対する直線的応答領域を利用する場合は、 $1.2 \times 10^5 \text{ R}$ 以下になるように照射時間を決める。厳密な測定の場合あるいは照射時間が短い場合は、照射開始、終了時の端効果の補正を行なう。端効果の補正時間 $\Delta\tau$ は多くの場合照射位置によって異なることに、留意する必要がある。

- (4) 照射後適当な時間に透過率 T (あるいは吸光度) の測定を行なう。

照射時間 τ 、照射後測定するまでの時間 t を記録する。ただし t は厳密な値である必要はない。 τ があまり大きくないかぎり、 t を 30 分から 2 時間程度にとるのが、fading 補正をほとんど無視できるので便利である。なお照射後測定前にはアルコールなどで試料面の洗浄を行なう。

- (5) 照射線量あるいは吸収線量を算出する。

計算は次の順序にしたがって行なう。(プログラム化すると便利である)

1. 吸光度変化 $A(\tau, t)$ を求める。

$$A(\tau, t) = -\text{Log}_{10}(T/T_0)$$

2. fading 定数を求める。(ただし fading 補正係数がほとんど 1 に等しいと予測される場合は、2. と 3. の過程は略してよい。

$$\bar{\lambda} = 0.0075 \cdot A(\tau, t) + 0.0127$$

3. fading 補正係数 f を決定する。

$$f = (1 - \bar{\lambda}) \cdot \tau \cdot \{ (\tau + t)^{1 - \bar{\lambda}} + t^{1 - \bar{\lambda}} \}^{-1}$$

ただし、 $t \gg \tau$ では $f = t^{-\bar{\lambda}}$

$$t \ll \tau \quad \text{では} \quad f = (1 - \bar{\lambda}) \tau \bar{\lambda}$$

4. 補正された吸光度変化 A_γ を決定する。

$$A_\gamma = A(\tau, t) \cdot f$$

5. 実効照射線量 X_e を求める。

$$X_e = 4.15 \times 10^5 \cdot A_\gamma \quad (A_\gamma \leq 0.3)$$

$$X_e = (1.58 \cdot A_\gamma^3 - 1.45 \cdot A_\gamma^2 + 5.34 \cdot A_\gamma - 0.268) \times 10^5 \\ (1.5 \geq A_\gamma > 0.3)$$

6. 照射線量率を求める。

$$\dot{X} = f_a \cdot X_e \cdot \tau^{-1}$$

τ は端効果を補正した実効照射時間

f_a はフィルターを含めた一次線の減衰に対する補正係数 (4.1 で述べた照射方法では $f_a \approx 1$ とみなせる)

7. 媒質内部の吸収線量 D_m を求める。

$$D_m = 0.869 \frac{(en\mu/\rho)_m}{(en\mu/\rho)_{air}} \cdot X_e$$

ここで $(en\mu/\rho)_{air}$, $(en\mu/\rho)_m$ はそれぞれ空気と媒質の質量エネルギー吸収係数である。厳密にはコバルト・ガラス 1 枚の中でも、 $^{60}\text{Co} - \gamma$ 線の強度は約 2% (平均減衰率 1%) 減衰することも考慮する必要がある。

Appendix 2.*

減衰係数, エネルギー吸収係数一覧表

Table 1.1 Mass attenuation coefficient (μ/ρ)g and mass energy absorption coefficient ($(en\mu/\rho)$)g for cobalt glass.

Photon energy (MeV)	(μ/ρ) g	$(en\mu/\rho)$ g	$\frac{(en\mu/\rho)_g}{(en\mu/\rho)_{air}}$	$\frac{(en\mu/\rho)_g}{(en\mu/\rho)_{water}}$
0.015	4.6360	4.2500	3.401	3.295
0.020	2.0204	1.7169	3.427	3.400
0.030	0.7005	0.4702	3.383	3.358
0.040	0.3907	0.1937	3.144	3.124
0.050	0.2792	0.1012	2.706	2.643
0.060	0.2288	0.0638	2.253	2.154
0.080	0.1829	0.0370	1.600	1.485
0.10	0.1625	0.0293	1.292	1.182
0.15	0.1377	0.0263	1.067	0.962
0.20	0.1235	0.0270	1.020	0.916
0.30	0.1063	0.0286	0.997	0.897
0.40	0.0948	0.0292	0.995	0.891
0.50	0.0864	0.0295	0.990	0.891
0.60	0.0800	0.0292	0.990	0.890
0.80	0.0700	0.0283	0.988	0.889
1.0	0.0629	0.0275	0.990	0.888
1.5	0.0512	0.0251	0.989	0.888
2.0	0.0441	0.0232	0.993	0.893
3.0	0.0358	0.0205	1.000	0.903
4.0	0.0312	0.0189	1.012	0.913
5.0	0.0281	0.0178	1.025	0.928
6.0	0.0261	0.0171	1.036	0.945
8.0	0.0233	0.0162	1.060	0.971
10.0	0.0217	0.0157	1.077	0.996
1.25**	0.0564	0.0264	0.993	0.887

* Reference 11

** 1.25 MeV data was calculated by Lagrangian interpolation.