

JAERI-M
82-033

C T A 線量計 マニュアル

1982年4月

田中 隆一・三友 昭市・須永 博美
松田 光司・田村 直幸

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、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、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

CTA 線量計 マニュアル

日本原子力研究所高崎研究所開発部

田中 隆一・三友 昭市・須永 博美

松田 光司⁺・田村 直幸

(1982年3月16日受理)

電子線およびガンマ線を対象とした大線量測定用のCTA(三酢酸セルロース)線量計を取扱うために必要なマニュアルを作成した。

CTA線量計は線量に比例した応答を示し、有効測定範囲は1～15Mradである。通常の電子線照射条件のもとでは応答は線量率、温度および湿度に依存しないが、ガンマ線照射条件では、温度および湿度に依存する。CTAはテープ状であるので、フィルム片を用いた個別測定以外に、長尺テープを用いた連続的な線量分布測定が可能である。

本マニュアルでは、CTA線量計の諸特性、読み取り用の吸光度測定器、フィルム片および長尺テープを用いた標準的な測定手順、線量換算法、線量計の精度、代表的な応用例について述べる。

Manual of CTA Dose Meter

Ryuichi TANAKA, Shoichi MITOMO, Hiromi SUNAGA,
Koji MATSUDA⁺ and Naoyuki TAMURA

Division of Development,
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, JAERI

(Received March 16, 1982)

A dosimetry manual is presented for practical use of CTA(cellulose triacetate) dose meter for high level electron and gamma-ray dosimetry. The reading of CTA dose meter has linear response to dose, and the effective measuring range is one to fifteen Mrad. The dose response does not depend on dose rate, temperature and humidity under usual irradiation conditions with electron beams, whereas it depends on temperature and humidity under usual irradiation conditions with γ -rays. Since CTA dose meter is available in a form of film strip, the measurement can be done either on separate short pieces of film from point to point or on a piece of long strip to obtain a dose distribution curve directly. The CTA dose meter in a form of film stack can be used for measurement of depth dose distribution. The present manual describes properties of CTA dose meter, an instrument for optical absorbance measurement, standard procedures for dose measurement using film pieces or long film strip, method of conversion from optical absorption to dose, accuracy of dose measurement, and a few examples of practical applications.

Keywords : CTA Dose Meter, Dosimetry Manual, Electron Beam, Gamma-Ray, Film Piece, Long Tape Strip, Measurement Procedure, Dose Conversion, Measurement Instrument, Accuracy

+ Osaka Laboratory for Radiation Chemistry, JAERI

目 次

1. まえがき.....	1
2. C T A 線量計の特性.....	2
2. 1 基本的な特徴.....	2
2. 2 線量測定用 C T A フィルム.....	2
2. 3 電子線, γ 線に対する線量応答.....	3
2. 4 線量率効果.....	3
2. 5 照射中の温度および湿度の影響.....	4
2. 6 照射後の保存効果.....	5
2. 7 その他の影響.....	5
2. 8 Numelec 社製フィルムとの比較.....	6
2. 9 吸光度変化の化学的機構について.....	7
3. 吸光度測定法.....	15
3. 1 分光光度計.....	15
3. 2 専用計器.....	16
4. 標準的な測定手順.....	18
4. 1 フィルム片を用いた測定の手順.....	18
4. 2 長尺テープを用いた連続測定の手順.....	19
4. 3 付記事項.....	20
5. 線量換算法.....	22
5. 1 電子線照射における線量換算.....	22
5. 2 γ 線照射における線量換算.....	22
6. 線量計の精度.....	25
7. C T A 線量計の応用例.....	26
7. 1 電子線照射における深部線量分布測定.....	26
7. 2 電子線照射における強度分布測定.....	26
7. 3 γ 線照射への応用.....	27
8. あとがき.....	29
謝 辞.....	30
参考文献.....	31

Contents

1.	Introduction	1
2.	Properties of CTA Dose Meter	2
2.1	Dosimetric Characteristics	2
2.2	CTA Film for Desimetry	2
2.3	Dose Response to Electron Beam and γ -rays	3
2.4	Effect of Dose Rate	3
2.5	Influence of Temperature and Humidity under Irradiation	4
2.6	Effect of Post-irradiation during Storage	5
2.7	Other Influence	5
2.8	Comparison with Numelec's Film	6
2.9	Chemical Mechanism of Radiation Induced Optical Density Change	7
3.	Methods of Optical Absorbance Measurement	15
3.1	Spectrophotometer	15
3.2	Specially Designed Instrument	16
4.	Standard Procedure for CTA Dose Meter	18
4.1	Standard Procedure with Separate Short CTA Pieces	18
4.2	Standard Procedure of Continuous Measurement with Long CTA Tape	19
4.3	Notes on Standard Procedures	20
5.	Method of Dose Conversion	22
5.1	Dose Conversion for Electron Beam	22
5.2	Dose Conversion for γ -rays	22
6.	Uncertainty in CTA Dose Meter	25
7.	Typical Applications	26
7.1	Measurement of Depth Dose Profile for Electron Beams	26
7.2	Measurement of Intensity Profile for Electron Beams	26
7.3	Application to γ -ray Irrdiation	27
8.	Summary	29
	Acknowledgement	30
	References	31

1. まえがき

CTA(Cellulose triacetate, 三酢酸セルロース)線量計の開発研究は1972年から日本原子力研究所とフランスの原子力庁との放射線化学に関する日仏研究協力における共同研究テーマとして実施されてきた。TPP(Triphenylphosphate, トリフェニルホスフェート)を添加物とする線量測定用のCTAフィルムは最初はフランスのNumelco社から市販され、実用線量計としての基本的特性が調べられた。その結果CTA線量計の線量率依存性、温度依存性、照射後の保存効果などが明らかとなり、これらをもとに予備的なマニュアル^{1),15)}が作成された。

CTA線量計はとくに電子線照射プロセス用として次第に普及してきたが、1977年にNumelco社がCTAフィルムの製造を停止したため、それに代るフィルムの供給が必要となった。原研では国内でのフィルム製造によるCTA線量計の実用化を意図して、富士写真フィルム㈱の協力を得て、線量計としてのフィルムの最適条件を調べるとともに、線量計の化学的機構についての基礎研究を行った。その結果、CTAフィルムの添加物はTPPのみがよいこと、添加量とフィルムの厚さは変更の必要がないことがわかる²⁾とともに、照射による吸光度変化の化学的機構が定性的にかなり解明された³⁾。一方、フランス側もCTA線量計フィルムの製造を日本に依頼することになり、試作フィルムについての特性試験を双方で行った⁴⁾。これらの成果をもとに、1981年富士写真フィルム㈱が線量計用CTAフィルム(FTR-125)を製品化した。

本マニュアルはFTR-125の実用線量計としての特性について調べた結果をもとにし、CTA線量計を実際に取扱う上で必要と思われる知識をまとめたものである。

線量計の特性試験においては、最近フィルム線量計の照射環境の影響が重要視されていることを考慮して、温度と湿度が独立に正確に設定できる方法を採用し、多様な照射環境に対して本マニュアルが適用できるようにした。線量校正技術に関しては、まだ多くの問題が残されており、校正に関わる不確定さを正確に評価できる段階ではないが、これまで原研で改良を加えてきた電子エネルギー校正法と電子流密度測定をもとにした線量校正法を適用した⁵⁾。

本マニュアルの構成は以下の通りである。2章では線量計の諸特性、およびNumelco社製フィルムとの比較について述べるとともに、吸光度変化の化学的機構についても簡単に触れる。3章では線量の読み取り計器としての分光光度計の使用法および注意事項について述べるとともに、CTA線量計のために開発された専用計器⁶⁾の概要について述べる。4章ではフィルム片を用いた個別測定と長尺テープを用いた連続測定に推奨できる標準的な測定手順を述べる。5章では上記の測定手順で得られたCTAフィルムの吸収線量から測定しようとする物質の吸収線量への換算法を述べる。6章では線量計測の精度について考察し、CTA線量計の精度の概算結果について述べる。7章ではCTA線量計の代表的な二、三の応用について述べる。

2. CTA線量計の特性

2.1 基本的な特徴

- (1) 15Mrad付近の線量域まで線量に比例するレスポンスをもつ。約15Mrad以上では線量に対する比例性は保たれなくなる。有効測定範囲は1~15Mradであるが、有効範囲を超えた線量域についても、校正曲線を用いれば、30Mrad付近まで測定が可能である。
- (2) 通常の電子線照射(100Mrad/h以上の高線量率)では、単位線量あたりの吸光度増加量で表わされる校正定数は線量率、照射下の温度(0~50°C)および湿度に依存せず一定である。
- (3) 通常のγ線照射(10k~1Mrad/hの線量率)では校正定数は線量率に対してほぼ一定であるが、照射中の温度および湿度に依存する。したがって線量値の算出には温度、湿度の補正が必要である。
- (4) 照射後、吸光度は時間とともにゆっくり上昇していく傾向があるが、その速度は次第にゆるやかになる。ただし短時間の電子線照射では、照射直後の10~20min間は速い下降を示す。
- (5) 通常の室内光の露光によって吸光度はほとんど変化しない。
- (6) 受感体としてのCTAは空気、水、種々のプラスチック材料、食品類などと実効的に等価な原子番号をもつ。
- (7) フィルムの厚さは0.125mm(公称値)であるので、γ線にくらべて透過力の弱い電子線にも十分使用できる。
- (8) フィルムの通常の形態が長いテープ状であるので、フィルム片を用いた個別的な測定以外に、長尺テープを用いた連続的な線量分布測定が可能である。
- (9) シート状のフィルムも利用できるので、二次元的な線量分布の測定も可能である。

2.2 線量測定用CTAフィルム

線量測定用CTAフィルム(FTR-125)の諸元を以下に示す。

重量組成	三酢酸セルロース($C_{12} H_{16} O_8$) _n	85%
	トリフェニルホスフェート, $C_{18} H_{15} O_4 P$	15%
公称の厚さ		0.125mm
実際の厚さ(Batch No. 1)		0.122 ± 0.005mm
テープ巾		8mm
密度		1.29 g/cm ³
リール一巻のテープの全長		100m
シートの大きさ		300 mm × 350 mm

標準測定波長	280 nm
未照射フィルムの吸光度, A_0 (280 nm, Batch No. 1)	0.12~0.13
重量平均原子番号 (\bar{Z})	6.7
質量衝突阻止能 (1 MeV 電子)	1.74 MeV · cm ² / g
質量エネルギー吸収係数 (⁶⁰ Co γ 線)	0.0281 cm ² / g
質量減衰係数 (⁶⁰ Co γ 線)	0.0604 cm ² / g
線量校正定数 K (線量率 100 Mrad / h 以上, 照射後保存時間: 2 h, 厚さ: 0.125 mm, Batch No. 1)	0.063 (Mrad) ⁻¹

Fig. 1 にリールに巻かれた線量測定用 CTA フィルム (FTR-125) の外観を示す。

2.3 電子線, γ 線に対する線量応答

電子線, γ 線の照射による 280 nm の標準測定波長での吸光度増加分は, 15 Mrad 付近まで線量に比例するが, それ以上の線量では, 線量に対する増加の割合は多少低下する。

Fig. 2 に電子線および γ 線照射に対する 280 nm での吸光度増加分 ΔA と線量との関係の実測例を示す。照射条件は, 電子線照射の場合は, 線量率約 10⁹ rad/h, 温度 15°C, 湿度 60% であり, γ 線照射の場合は, 線量率 10⁶ rad/h, 温度 25°C, 湿度 50~60% であった。 ΔA の測定はいずれも照射終了時から 2 h 後に行った。横軸の吸収線量は CTA の吸収線量を示し, 縦軸は公称厚さ 0.125 mmあたりに換算された ΔA を示す。

単位線量あたりの ΔA で表わされる線量校正定数 K (Mrad)⁻¹ の値は電子線照射と γ 線照射の場合で異なるが, これは線種による差異を意味するものではなく, 後述のように K 値が線量率によって異なることに起因している。すなわち 10⁹ rad/h 付近では K = 0.063, (Mrad)⁻¹ 10⁶ rad/h 付近では K = 0.081 (Mrad)⁻¹ の値を示す。

吸光度測度を利用した線量計の有効測定範囲は, 吸光度の測定精度, 線量応答およびその応答パターンなどによって決定される。実用線量計の精密さ (Precision) の目安を $\pm 5\%$ とすると, 0.05 以下の吸光度変化をそれ以上の精密度で測定するのは一般には難しい。したがって CTA 線量計の場合, 有効範囲の下限は 1 Mrad 付近とみなせる。上限については, 吸光度が 1 以上の領域は一般に測定の正確度が低下すること, および CTA 線量計では 15 Mrad 付近以上では線量に対する ΔA の比例性が保たれなくなることを考慮すると, 15 Mrad が妥当な値であると考えられる。したがって有効測定範囲は 1~15 Mrad とした。土 10 %程度あるいはそれ以上の誤差が許容されるならば, さらに広範囲の線量域の測定が可能である。ただし照射によってフィルムがもろくなることを考慮すると, 30 Mrad 付近が測定可能な上限とみなせる。

2.4 線量率効果

CTA 線量計の場合, ΔA の線量に対する比例性そのものは Fig. 2 に示すように線量率によって変わらないが, 比例定数に相当する線量校正定数 K は線量率によって異なった値を示す。

Fig. 3 に電子線および γ 線照射に対する K 値の測定結果と線量率との関係を示す。電子線の

照射条件は、温度 20 °C、湿度 50 %であり、 γ 線の照射条件は、温度 18 °C、湿度 50 ~ 60 %であった。K 値は照射終了時から 2 h 後の公称厚さ 0.125 mmあたりに換算された 1 Mrad あたりの ΔA を表わす。

K 値は $10^6 \sim 10^7$ rad/h の線量率範囲で大きく変化するが、 10^8 rad/h 以上の高線量率で 0.063 (Mrad)⁻¹ の一定値を示し、 10^6 rad/h 以下の低線量率で 0.081 ~ 84 (Mrad)⁻¹ のほぼ一定値を示す。

10^{10} rad/h 以上の高線量率領域における CTA 線量計の線量率効果については、 10^{13} rad/h 以上の超高線量率領域のみで線量応答の減少が報告されている⁷⁾ (測定波長 290 nm)。このことは $10^8 \sim 10^{13}$ rad/h の範囲では K 値は一定であることを示唆している。

2.5 照射中の温度および湿度の影響

放射線化学反応を利用したフィルム線量計に共通する問題は種々の環境条件の影響を受け易いことである。特に照射下の温度、湿度が線量計の特性に与える影響は基本的に重要である。

Fig. 4 に電子線照射中の環境温度および湿度の条件を変えたときの K 値と線量率との関係を示す。線量率が低くなるほど、すなわち線量が一定ならば照射時間が長くなるほど、温度および湿度の影響を受け易い。また 10^8 rad/h 以下の線量率では、温度が高くなるほど K 値は高い値を示すが、湿度については顕著な影響はない。これらの結果から、線量率が 10^8 rad/h 以上で、照射中の温度が 50 °C に達しない通常の電子線照射条件のもとでは、照射中の温度および湿度の影響は無視できる。すなわち線量校正定数 K は一定値 (Batch No. 1 に対して 0.063 (Mrad)⁻¹) を示す。超高線量率での線量応答の実測例⁷⁾ から判断して、この値は $10^8 \sim 10^{13}$ rad/h の広範囲の線量率にわたって適用し得ると考えられる。

Fig. 5 および 6 にそれぞれ 0.7 Mrad/h および 0.12 Mrad/h の γ 線照射における湿度 60 %での照射中の温度と 25 °C を基準とする ΔA の相対値との関係を示す。いずれの場合も温度が高くなるほど ΔA は大きくなる。 ΔA の温度係数は、0.7 Mrad/h では -10 ~ 70 °C の範囲ではほぼ一定であり、0.12 Mrad/h では -10 ~ 50 °C の範囲で同様にはほぼ一定である。ただし温度係数の値は、20 °C を基準とすると、0.7 Mrad/h では 0.46 %/°C、0.12 Mrad/h では 0.66 %/°C であり、線量率が低い方が大きい値を示す。温度がさらに高くなると、いずれの場合も温度係数が急激に高まる傾向がみられる。

Fig. 7 および 8 にそれぞれ 0.7 Mrad/h および 0.12 Mrad/h の γ 線照射における温度 25 °C の照射中の湿度と相対湿度 60 %を基準とする ΔA の相対値との関係を示す。いずれの場合も湿度が高くなるほど ΔA は大きくなるが、その依存度は温度の場合に比べて小さい。 ΔA の湿度係数 20 ~ 90 % の湿度範囲ではほぼ一定であり、0.7 Mrad/h では湿度 10 % の変化に対して 1.8 %、0.124 Mrad/h では湿度 10 % の変化に対して 2.5 % である。湿度係数の場合と同様に、線量率が低い方が高い値を示す。

Fig. 9 に 0.7 Mrad/h、40 °C の γ 線照射環境下での照射中の湿度と ΔA の相対値との関係を示す。25 °C の場合と同様に湿度係数は湿度に対して一定であるが、その値は湿度 10 % の変化に対して 3.2 % で、25 °C の場合の約 1.8 倍であり、湿度係数は湿度とともに高まることを示す。このこ

とは温度係数も湿度とともに高まることを示唆している。

以上から通常の電子線照射では、温度および湿度の影響は無視してよいが、 γ 線照射では温度および湿度の照射環境を考慮する必要がある。さらに γ 線照射では、K値の温度係数は、線量率が低いほどおよび湿度が高いほど大きくなる傾向があり、K値の湿度係数は、線量率が低いほどおよび温度が高いほど大きくなる傾向がある。

2.6 照射後の保存効果

一般にフィルム線量計は照射直後の応答が不安定な傾向をもつて、安定するまである程度の保存を必要とする場合が多い、CTA線量計では、吸光度は照射直後の短時間急速に下降した後にゆっくり上昇していく傾向をもつが、初期の減少は照射時間が長い場合には観測されない。

Fig. 10 および Fig. 11 にそれぞれ約 10 s の短い電子線照射および 3 h の長い γ 線照射を行った後の約 3 h の間の室温(～25°C)環境での ΔA の相対的変動の様子を示す。いずれの場合も照射後測定するまでの標準的な保存時間 2 h 経過後における ΔA を基準値とした。電子線照射の場合は、照射直後 10～20 min の間に急な下降を示すが、 γ 線照射の場合、この現象は全く見られない。電子線照射でも照射時間が長くなると、この下降現象は減退する。

長時間にわたるゆるやかな上昇現象については、電子線の場合も γ 線の場合も、その上昇速度は時間とともに低下していく。Fig. 12 に電子線照射後の 2 h 経過後の ΔA を基準値としたときの 10 day 間の室温下における相対的変動を示す。1 day 経過後では 1.03、10 day 後では 1.06 の値を示す。これらの値は照射時間が非常に長い場合を除いて、照射時間や線量にはあまり依存しない。

照射後 ΔA を測定するまでの標準的な保存時間は従来 30 min がとられていたが、Fig. 10 および 11 に見られるように、照射後 30 min では ΔA の上昇速度はかなり大きく、安定度はあまりよくない。しかし Fig. 12 に見られるように、十分長時間経過しても、吸光度は完全に安定に達するには致らない。したがって測定を行うのに適した時間帯としては、照射後の経過時間があまり長くなく、かつ ΔA の上昇速度が比較的ゆるやかになる領域を選んだ。その結果、標準保存時間を 2 h とし、その前後 1 h の幅をとって、1～3 h の範囲を測定の標準的な時間帯として決めた。これによって照射後の吸光度の変動による測定値の不確定さは約 1 % 以下になる。

2.7 その他の影響

(1) 露光の影響

放射線化学反応を利用した線量測定法は光とくに紫外光の影響を受け易いので、線量計素子の露光を避けるための工夫がよくとられる。

CTA 線量計の場合も照射中および照射後に強い紫外光にさらすと、吸光度の上昇が認められるが、通常の室内光の影響は無視できる。未照射フィルムの露光は、未照射時の吸光度および照射による応答にも影響を与えない。

(2) 溫湿度以外の照射雰囲気の影響

CTA線量計の通常の照射雰囲気としては空気を前提としている。真空中で照射した場合には、 ΔA の線量率依存性は見られず、高線量率の電子線照射の場合のK値に近い値をもつ。したがって通常の電子線照射では、空気中と真空中では応答は変わらないが、 γ 線照射の場合は、真空中の場合の方が空気中よりも20～30%低い値を示す。

水中にCTAフィルムを浸して γ 線照射を行い、照射後フィルムを空気中に取り出して吸光度測定を行うと、 ΔA は空気中の場合よりも低い値を示す。しかし真空中の場合ほど空気中との差異は大きくない。

(3) 有機溶剤の影響

プラスチック線量計では試料表面に付着した手あぶらなどの汚れを除去するには、有機溶剤に浸したガーゼなどで軽く表面を拭く方法がよくとられるが、溶剤の種類によってはフィルムの表面を傷めことがある。

CTAフィルムの場合、有機溶剤との接触によって添加剤のTPPが溶け出して吸光度が低下したり、フィルム表面が曇り、吸光度が高くなることがある。アセトン、メチルアルコール、エチルアルコールなどの使用はTPPを溶解する効果があるので使用は避けた方がよい。

(4) 未照射フィルムの吸光度の経時変化

CTAフィルムでは、リールに巻かれたテープのうち空気に直接さらされている部分の吸光度は長期間の暗所保存中に徐々に上昇する傾向が認められる。この現象は空気に直接さらされていない内側のテープについてはほとんど認められない。したがって、光の影響によるものではなく、空気に含まれている物質による影響（例えば酸化）と考えられる。吸光度の上昇速度は低温中の保存によって抑制することができるが、湿度の影響など詳しいことは不明である。未照射フィルムの吸光度の安定性はとくに長尺フィルムを用いた線量分布の連続測定において重要であるので、この現象についてさらに解明し、適切な対策を講ずる必要がある。

(5) 厚さのばらつき

フィルムの厚さについては、第1回目のバッチでは、 $0.122 \pm 0.005\text{ mm}$ であり、約±4%のばらつきが認められた。このばらつきはフィルムの製造法（溶剤キャスト法）に起因するものであるので、これ以下の値に抑えることは難しいと考えられる。

Fig. 13に電子線で4Mrad照射したCTAフィルムの厚さと ΔA との関係を示すが、この関係は原点を通る直線によって近似的に表わせる。このことは ΔA はフィルムの厚さに比例することを示す。この比例関係を表わす直線からの実測値の偏差は±2%以内であるので、厚さの補正を行うことによって測定はより精密なものとなる。

2.8 Numelec社製フィルムとの比較

富士写真フィルム（株）製のFTR-125と従来使用されていたフランスのNumelec社製フィルムとは、TPPの添加量、フィルム厚がほぼ同一であるため、線量計としての特性も基本的には同一である。しかし、次の3つの点において相違がみられる。

- (1) 測定波長 280nm における未照射フィルムの吸光度は、Numelec社製では0.26~0.28 であったが、FTR-125 では、0.12~0.13 であり、FTR-125 の方が“バックグラウンド”が小さい。この理由は Numelec 社製には吸光度を高める原因となる TPP 以外の微量の添加物が含まれているためと考えられる。FTR-125 の場合は添加物は TPP のみである。
- (2) 未照射テープに沿う吸光度の変動、すなわちバックグラウンドのノイズに相当するものは、Numelec 社製に比べて FTR-125 の方がはるかに小さい。とくにテープに沿う線量分布を連続的に測定する場合、ノイズの問題は重要であり、バックグラウンドのノイズが少ないほど低線量域まで精度よく測ることができる。フィルム片を用いた測定においても、このノイズは測定値のばらつきの原因となる。
- (3) FTR-125 の K 値は Numelec 社に比べて約 5% 低い値を示す。K 値はバッチごとに多少異なる可能性が考えられるので、新しいバッチに変わった段階で再校正を行う必要がある。

2.9 吸光度変化の化学的機構について

線量計が十分な信頼性を得るには、その測定の基礎となる放射線の受感体への作用が明らかにされていることが望ましい。放射線照射による CTA フィルムの吸光度変化の現象は、上に述べた特性から明らかなようにかなり複雑であり、その化学機構を全部解明することは容易でない。しかし、その多くの部分は松田、永井³⁾によって以下に述べる通りの解明がなされている。

CTA 線量計の着色（吸光度の増加）は照射中に起る着色の不安定成分および安定成分、ならびに照射後の着色の 3 成分から成ると考えられる。照射中に起る着色の不安定成分は CTA から生成するラジカルによるものであり、短時間の電子線照射直後に観測される ΔA の急速な低下は、生成した CTA ラジカルが空気中の O₂ と反応して消失することに対応している。一方照射中に起る着色の安定成分は CTA および TPP の放射線分解生成物に起因するものである。また、照射後の着色は N₂ 中、O₂ 中あるいは真空中で照射し、放置した場合には進行しないことから、空気の照射によって生成する NO₂ と CTA および TPP との反応生成物によるものであろうと考えられる。

これらの機構解明は短時間の電子線照射による CTA 線量計のふるまいをよく説明するが、 γ 線照射の場合に見られる低線量率での K 値の低下、照射下での温度や湿度の影響を説明するに到っていない。しかし、ここでいう「照射後の着色」が空気の照射によって生じた生成物とフィルムを構成する物質との副次的反応によるものであるならば、照射後に限らず、照射中でも進行するはずである。この副次的反応の影響は短時間の電子線照射の場合は無視できるほど小さいとしても、長時間の γ 線照射の場合は、これによって着色がかなり進行することが予想される。おそらく CTA 線量計の線量率依存性ならびに低線量率領域での温度および湿度依存性はこの副次的反応に起因するものと考えられる。このことは真空中で照射した場合は、 ΔA が線量率に依存せず低い値で一定していることからも同様に推測できる。



Fig. 1 CTA film (FTR-125) for dosimetry

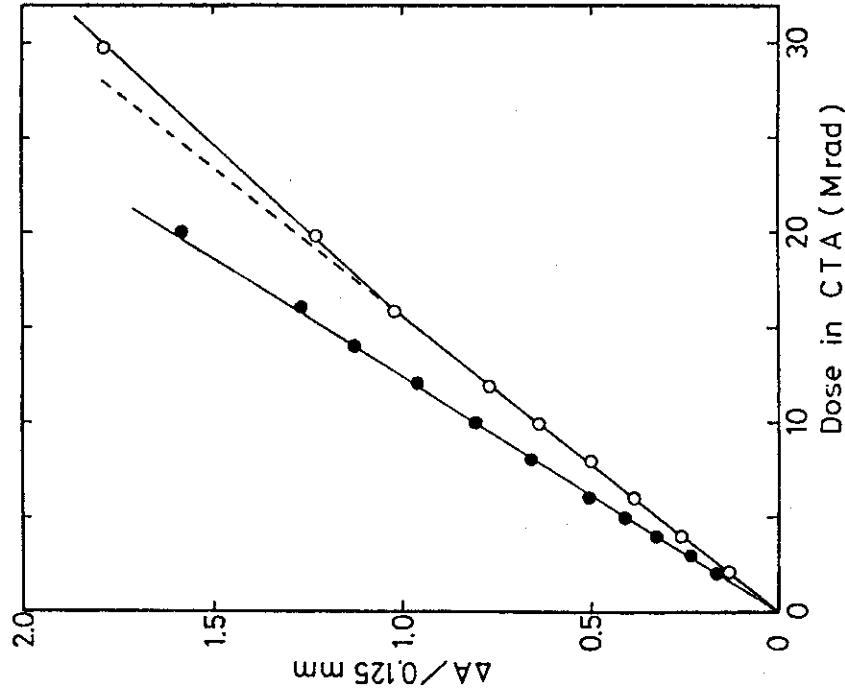


Fig. 2 The relations between the increment of optical density $\Delta A / 0.125 \text{ mm}$ at 280nm and dose in CTA by electron and γ -ray irradiation. The ΔA values were determined 2h after irradiation.

- : electron irradiation (dose rate : $\sim 10^9 \text{ rad/h}$, temperature : 15°C , relative humidity : 60%)
- : γ -ray irradiation (dose rate : 10^6 rad/h , temperature : 25°C , relative humidity : 50~60%)

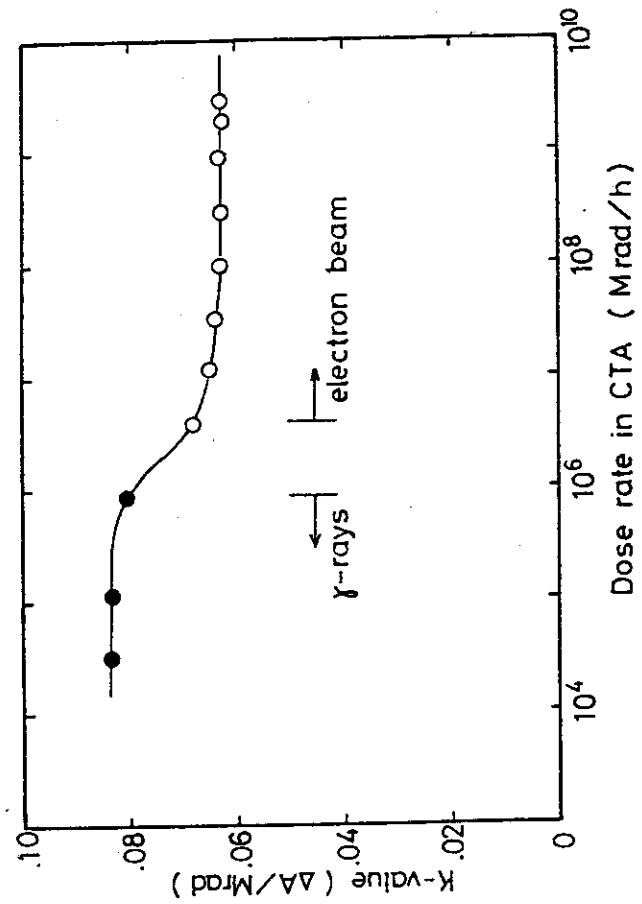


Fig. 3 The relation between the calibration constant K and dose rate by electron and γ -ray irradiation.

- : electron irradiation (temperature : 20°C , relative humidity : 50%)
- : γ -ray irradiation (temperature : 18°C , relative humidity : 50~60%)

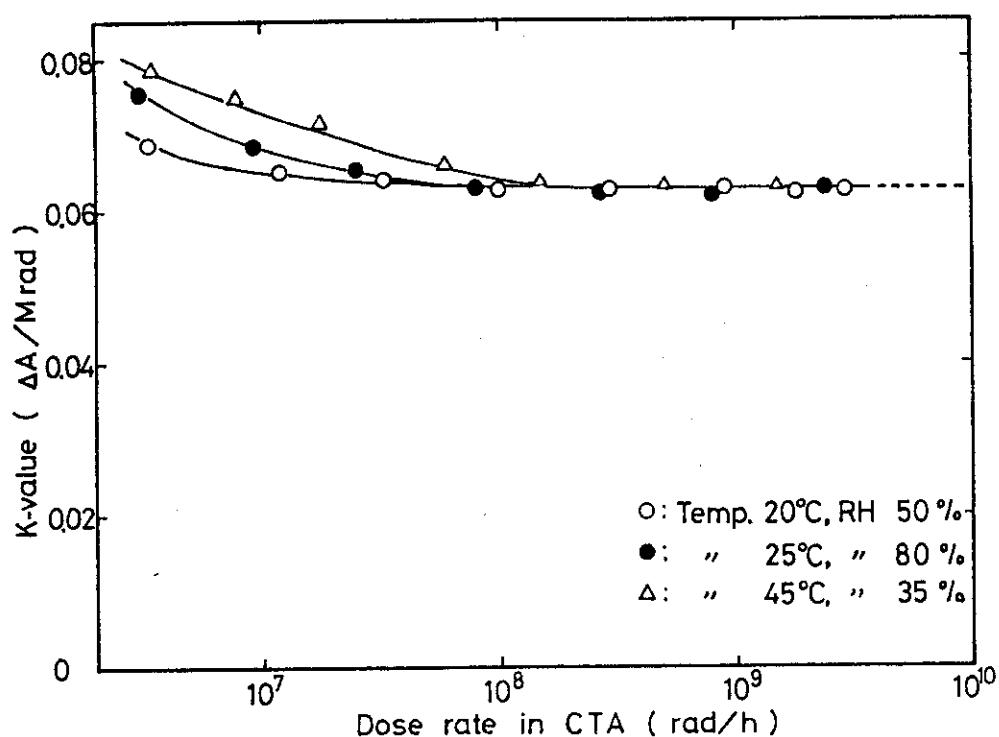


Fig. 4 The relations between the calibration constant K and dose rate by electron irradiation under different environmental conditions.

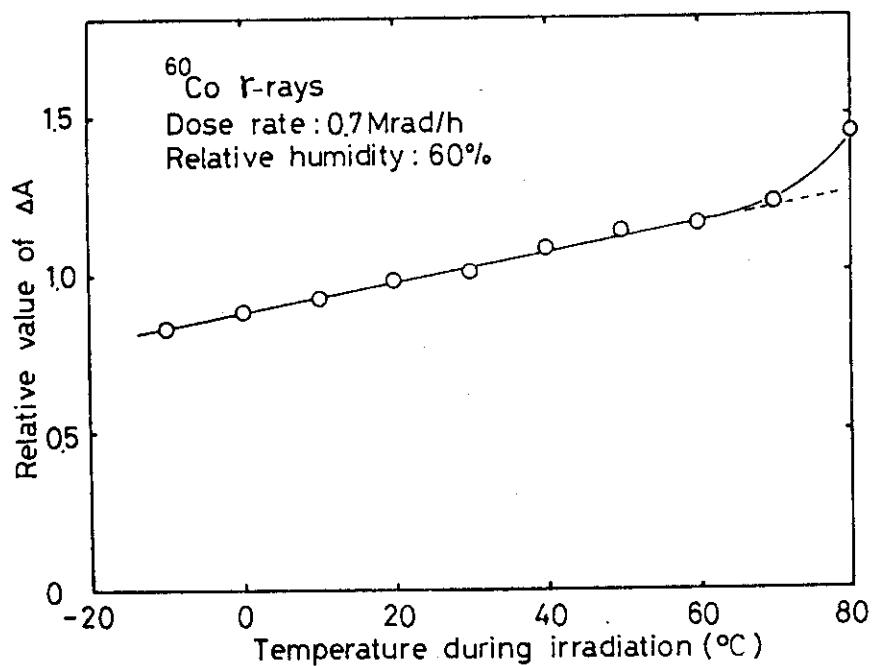


Fig. 5 Variation of ΔA relative to that at 25°C as a function of temperature during γ -ray irradiation at 0.7 Mrad/h.

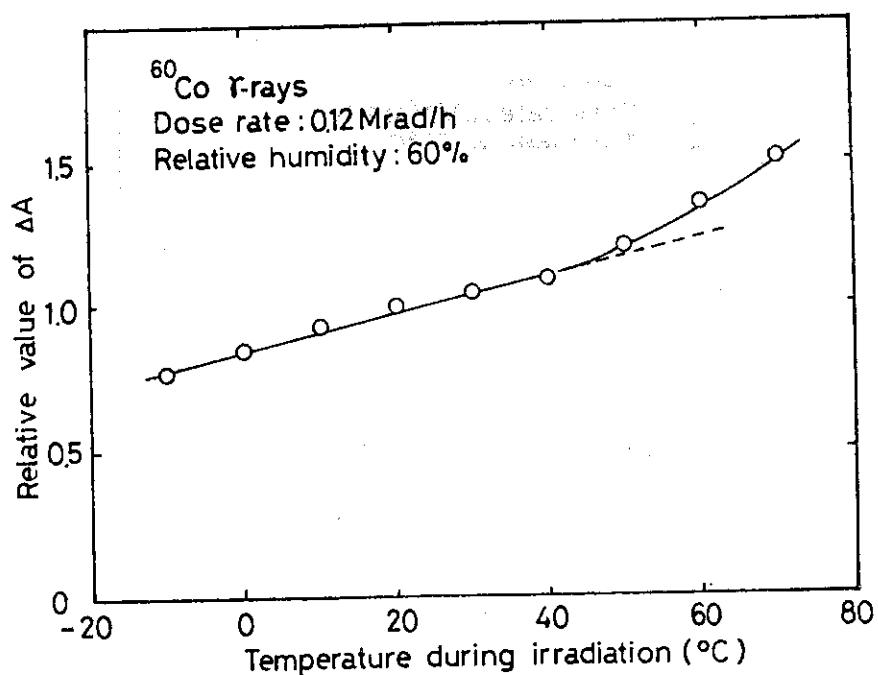


Fig. 6 Variation of ΔA relative to that at 25°C as a function of temperature during γ -ray irradiation at 0.12 Mrad/h.

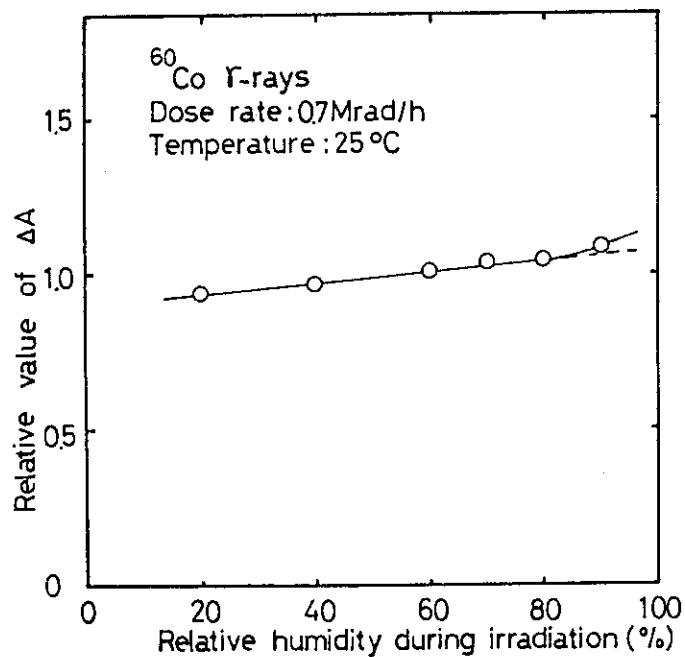


Fig. 7 Variation of ΔA relative to that at 60% relative humidity during irradiation at 0.7 Mrad/h. (temperature during irradiation : 25°C)

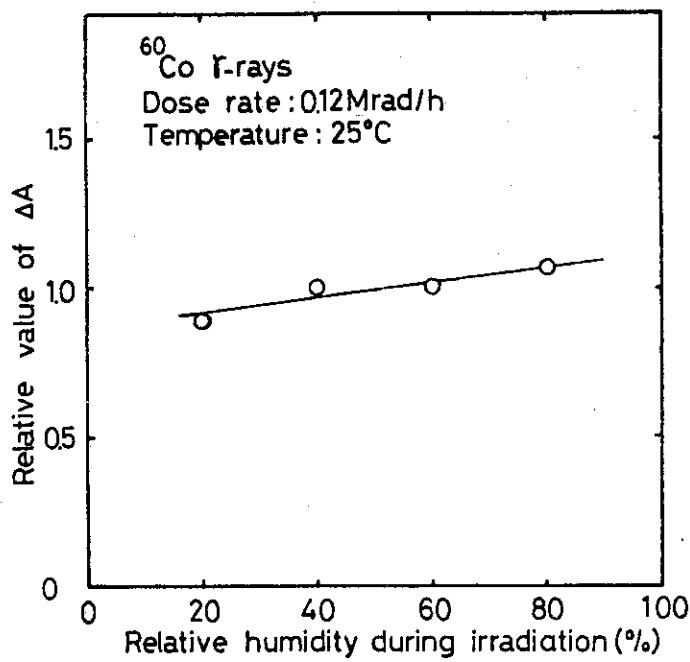


Fig. 8 Variation of ΔA relative to that at 60% relative humidity as a function of relative humidity during irradiation at 0.12 Mrad/h. (temperature during irradiation : 25°C)

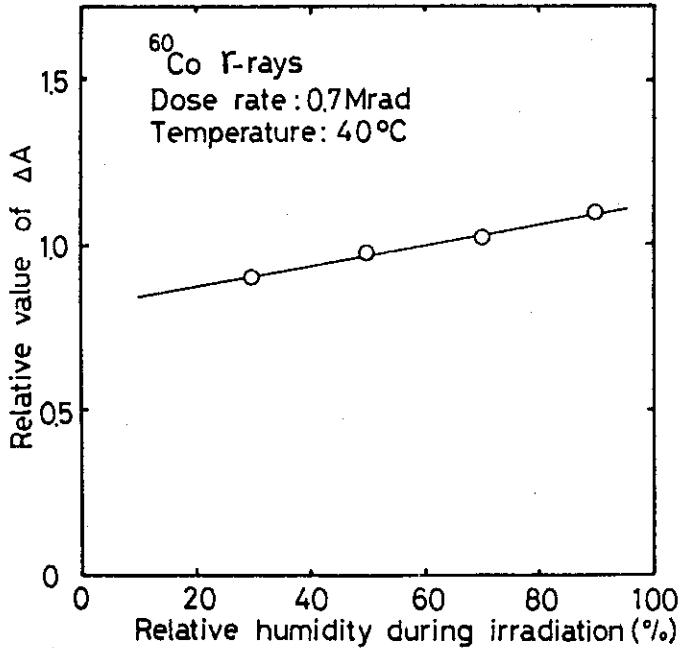


Fig. 9 Variation of ΔA relative to that at 60% relative humidity as a function of relative humidity during irradiation at 0.7 Mrad/h. (temperature during irradiation : 40°C)

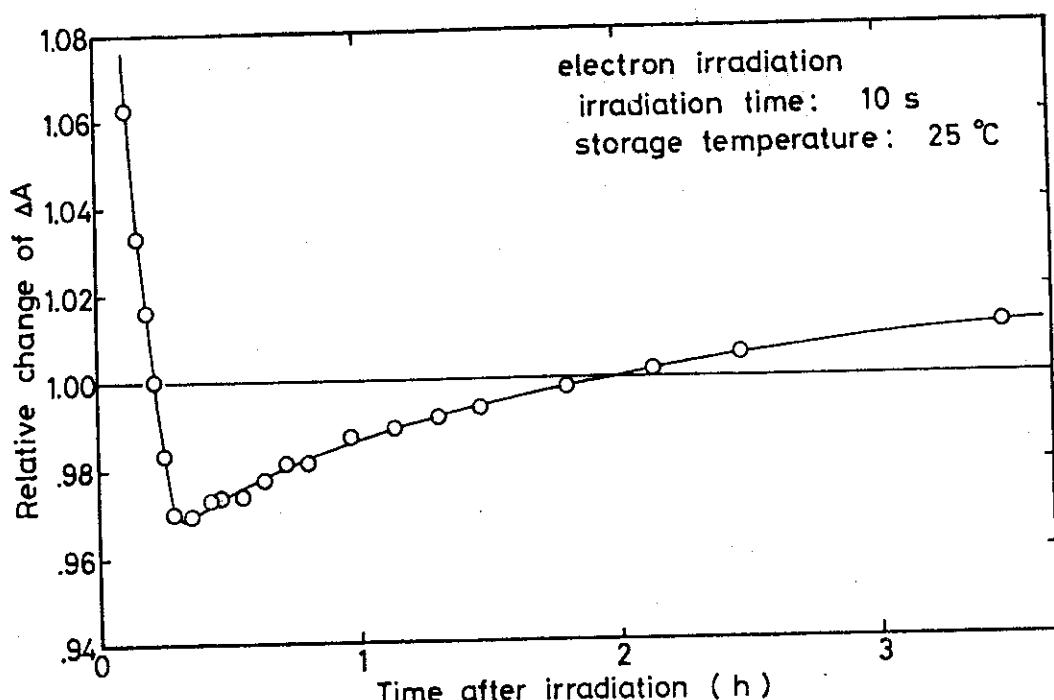


Fig.10 Change of ΔA relative to that measured 2h after short-time electron irradiation as a function of storage time at room temperature (25°C)

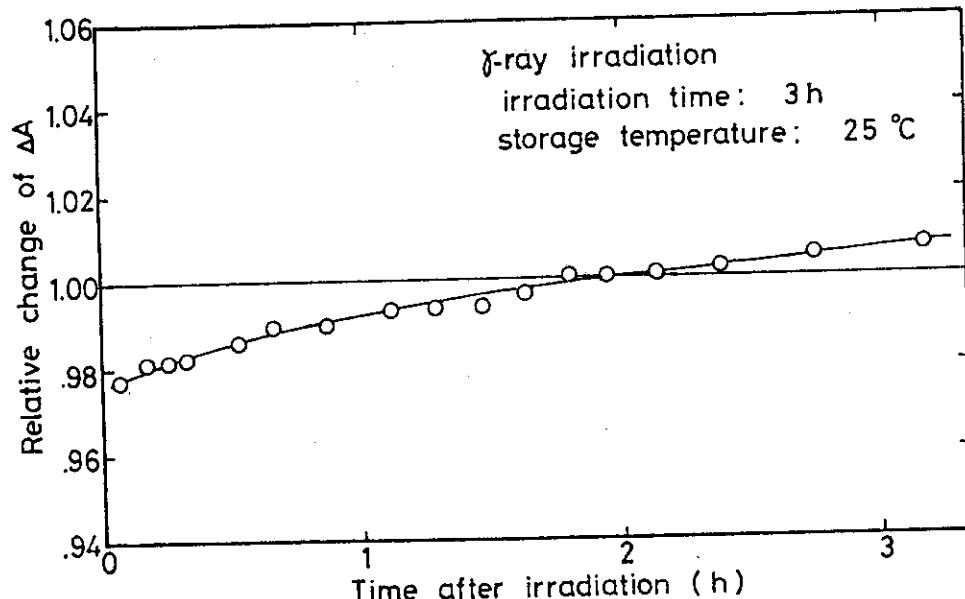


Fig. 11 Change of ΔA relative to that measured 2h after 3h γ -ray irradiation as a function of storage time at room temperature (25°C)

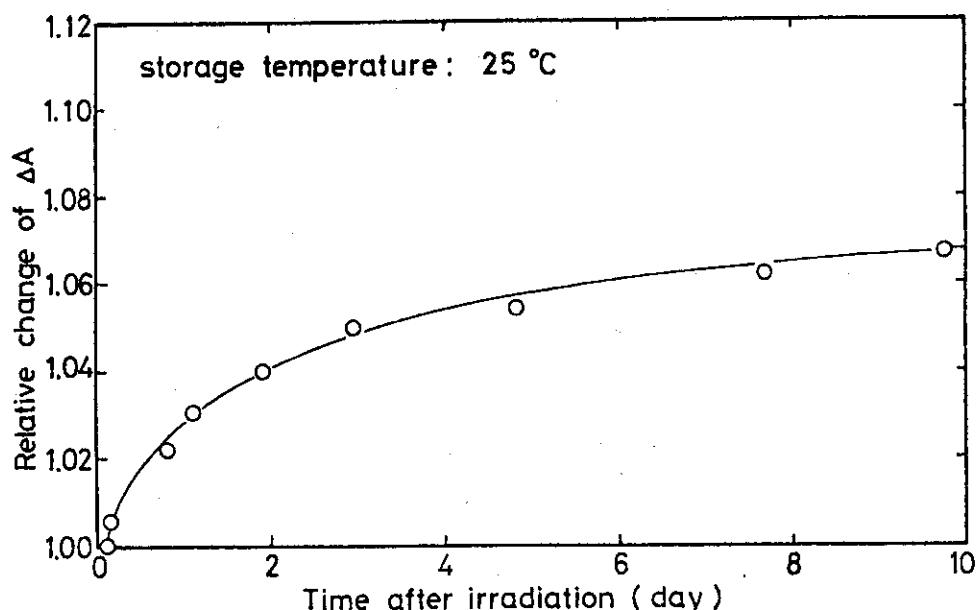


Fig. 12 Change for long period of response relative to that at 2h after short-time electron irradiation as a function of storage time at room temperature (25°C)

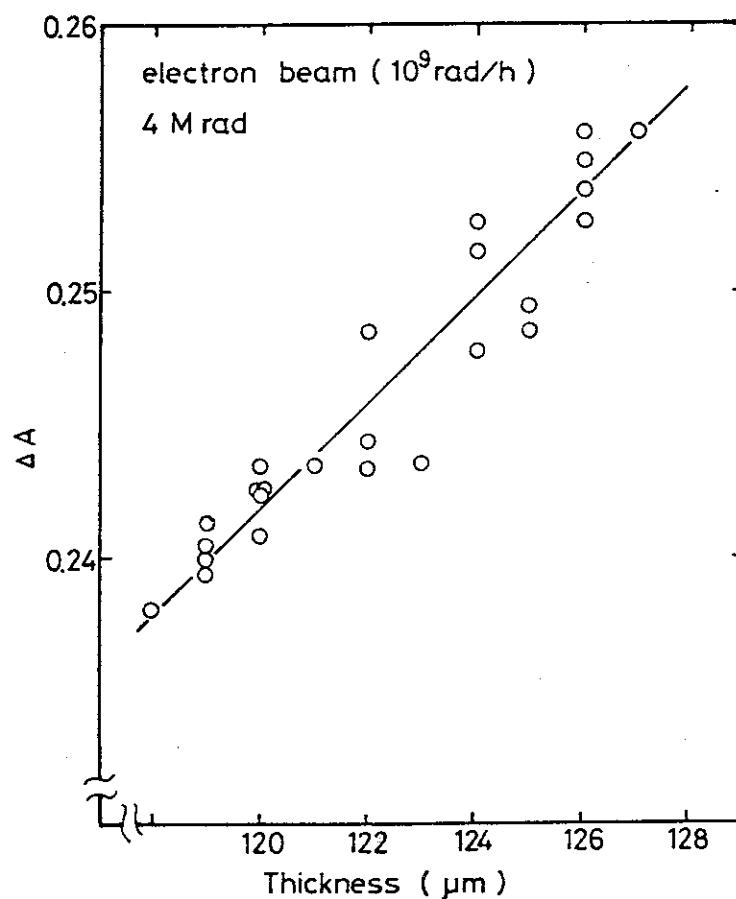


Fig. 13 The relation between radiation induced optical density ΔA and thickness of CTA film at a constant dose.

3. 吸光度測定法

CTA線量計のための吸光度測定器としては、一般に紫外可視域用の分光光度計が使用され

てきたが、最近は 280 nm 付近の単色光源を用いた専用計器(FDR)が開発され、実際に使用されるようになった⁶⁾。ここでは CTA 線量計の読み取り計器としての役割から見たそれぞれの測定法における配慮事項について述べる。

3.1 分光光度計

分光光度計を線量測定に使用する場合にとくに配慮すべき事項は、CTA フィルムの設定、測定波長の設定および吸光度の読み取りであり、それらについて以下に述べる。

(1) フィルムの設定

分光光度計を使用する場合には、通常フィルム片が試料として用いられる。一方、長尺テープを用いて連続的に線量分布を測定しようとする場合は、手動でテープを一定間隔ごとにずらしていくことのできる試料ホルダー、あるいは自動的にテープを送り込む機能をもつ試料ホルダーを用意する必要がある。この場合はテープ面に傷がつかないように注意しなければならない。

フィルム片を用いる場合はフィルムホルダーが必要である。CTA フィルムはテープの巾が狭く、かつリールに巻かれたことによる湾曲の癖が残っているため、フィルムの固定には注意を要する。入射光がフィルムを横切るビーム断面のうち、フィルムの幅方向の広がりが大きすぎないように配慮しなくてはならない。またフィルムの設定位置は入射光に対して常に同一位置の再現性が得られるようにする。光が透過するフィルム面上の位置が、照射前と照射後の測定においてずれると、測定の精密度は多少低下する。

(2) 波長の設定

CTA 線量計においては測定波長の設定精度はとくに重要である。放射線によって誘起された吸収スペクトルは波長が低いほど高い値を示し、特定の吸収ピークをもたない。測定波長 280 nm は、放射線によって誘起された吸収スペクトルを未照射フィルムのスペクトルを考慮して決定されたが、この波長領域では単位線量あたりの ΔA は大きな波長依存性を示す。280 nm を基準とすると、 $\pm 1 \text{ nm}$ の波長変化に応じて、 ΔA は約 $\pm 6\%$ も変化するので、波長の設定精度が $\pm 0.3 \text{ nm}$ の場合は、吸光度の測定値には $\pm 2\%$ の不確定さが生ずることになる。したがって CTA 線量計においては正確に波長を校正できる分光光度計を使用しなければならない。また定期的に波長校正チェックを行い、常に正確に波長設定ができるようにしておく必要がある。波長の校正には、通常水素ランプあるいは重水素ランプの輝線スペクトル(486.0 nm, 656.1 nm), 水銀ランプの輝線スペクトル(253.7 ~ 577.0 nm) が用いられる⁸⁾。近紫外域の波長校正には水銀ランプの方が適する。

スリット巾で決まるスペクトルバンド巾については、280 nm の波長が吸収スペクトルのピ

ークに対応しているわけではないので、とくに狭くとる必要はない。

(3) 吸光度の読み取り

吸光度の表示は透過率の対数変換によって得られるが、機種によってはこの変換が正確に機能しているかどうか定期的にチェックする必要がある。測光精度は、精密計器の場合、0~0.5の吸光度範囲では±0.002、0.5~1.0では±0.004とされているが、通常の測定では同じ試料でももっと大きなばらつきが観測される。系統的な測定誤差については、照射前と照射後の吸光度差を求ることにより多くの部分を取り除くことができる。

吸光度の校正には通常NBS標準フィルターが用いられているが、400 nm以下については、重クロム酸カリウム(JIS K8005容量分析用標準試薬)をN/20水酸化カリウムに溶解した重クロム酸カリウム溶液を標準試料として用いること⁸⁾によりさらに正確な校正が可能である。

3.2 専用計器

吸光度変化を利用する線量測定用の計器には従来から紫外可視領域用の分光光度計が用いられていたが、この方法は簡便さに欠け、携帯が難しい。また、とくにCTA線量計の場合、その正確さは測定波長の設定精度に影響される。これらの問題を解消するため、原子吸光分析に用いられているホローカソードランプからの単色光を利用した専用計器が考案され⁶⁾、製品化されるようになった。

この計器ではマンガンを陰極とするホローカソードランプと干渉フィルターを組み合せるこ^とによって、CTA線量計に適した279.5 nmの強い単色光を得ている。またCTAテープの自動送り機構を備えており、ペンレコーダーを併用すれば、テープに沿う線量分布を連続的に描くことができる。Fig.14に製品化されたCTA線量計の専用計器(FDR-01)の外観を示す。

この計器では長尺テープとともに短冊型のフィルム片による測定も可能である。長尺テープの場合、テープ送り速度は10 mm/sであり、テープの長さは少なくとも17 cm以上の長さが必要である。フィルム片の場合は、長さ約60 mmにカットして短冊型テープ枠に差し込むことにより測定できる。測光表示は吸光度(0~1.999)のみのデジタル表示であり、分光光度計による280 nmにおける指示値を示すように調整されている。

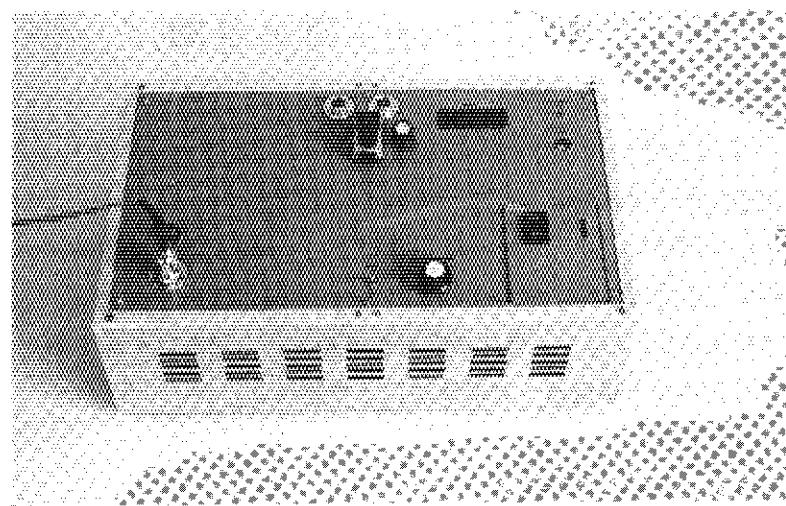


Fig. 14 Readout system for CTA dose meter (FDR-01).

4. 標準的な測定手順

CTA線量計の測定方法にはCTAテープを短冊型に切断したフィルム片を用いて、被照射体あるいは照射場の各点の線量を個々に求める場合と、長いテープをそのまま被照射体あるいは照射場にセットして照射し、テープの自動送りによって連続的に線量分布を求める場合がある。ここではそれぞれの方法について推奨される標準的な測定手順について述べる。

なお、本手順ではCTAフィルム自体の吸収線量を求める段階に止めておく。CTAフィルムを囲む物質など他の物質の線量値への変換法は5で述べる。

4.1 フィルム片を用いた測定の手順

- (1) CTAテープを吸光度測定用の試料ホルダーの寸法に合せて、適当な長さのフィルム片にカットする。複数個使用する場合には、油性のマジックペンなどでフィルム片の端部に試料番号を付ける。専用計器(FDR)を用いる場合はフィルム片の長さを6~7cm程度とする。
- (2) フィルムの端部を手に持って、フィルム面上の測光部分に付着しているほこりを柔かい紙で軽く払い取る。払い取り紙としてはキムワイプ、ティッシュペーパーなどが便利である。ティッシュペーパーの場合は、とくに粉体が発生して静電付着を起し易いので、軽く拭き取るようにする。これまでの手順では、フィルム面に指を直接触れたり、傷を付けないように注意する。
- (3) 分光光度計を使用する場合は、測定波長を280nmに正確に設定し、スペクトルバンド巾が0.5~2nmになるようにスリット巾を設定する。専用計器を使用する場合は、波長やスペクトルバンド巾の設定は不要であり、電源スイッチONの後、30分以上の予熱時間をおいてから、吸光度の零調整のみを行えばよい。この場合試料ホルダーには短冊型テープ枠を用いる。
- (4) 各試料をフィルム面が入射光の向きに垂直になるように試料ホルダーにセットし、未照射時の吸光度 A_0 を測定する。通常 A_0 の値は長期間空気に直接さらされたリールの外側のテープを除いて、0.12~0.13のほぼ一定値を示すので、かならずしも個々の試料について測定する必要はない。任意の一つの試料の値あるいは数枚の試料の平均値を A_0 の共通の値として用いてよい。この場合 A_0 の値のばらつきは測定誤差に含まれることになる。 A_0 の測定を行うかどうかは要求される精密さの度合に応じて決めればよい。 A_0 の測定を行わない場合は、(2)~(4)の手順は省略できる。
- (5) 試料を照射場あるいは被照射体にセットし、照射する。照射パラメータ（線量率、照射時間、電圧、電流、コンベア速度など）の選択が可能で、かつ照射パラメータと線量とのおおよその関係がわかっている場合は、吸光度測定の誤差がとくに問題にならない数Mradの線量値が得られるように照射パラメータを適当に決める。電子線照射の場合は、

平均線量率はできるかぎり 10^8 rad/h 以上、環境温度は 50°C 以下になるようにする。 γ 線照射の場合は環境温度および湿度の大体の値を知っておくとともに、平均線量率は $10^4 \sim 10^6 \text{ rad/h}$ の範囲内とする。

- (6) 照射後試料を室温で一定時間保存する。標準の保存時間は 2 h とし、その前後 1 h の巾をとって、 $1 \sim 3 \text{ h}$ を測定の標準的な時間帯とする。これ以外の保存時間を採用する場合は、Fig. 10 ~ 12 を用いて照射後の $\Delta A (=A - A_0)$ の変動に対する補正を後に述べる補正係数 f によって行う必要がある。ただし、短時間の電子線照射の場合、照射直後の $10 \sim 20 \text{ min}$ の間は吸光度が急速に低下するので、測定は避けなければならない。
- (7) 照射後の吸光度 A を A_0 の測定の場合と同じ手順で測定する。この測定が終るまでフィルム表面は素手で触れたり、傷をつけたりしないように注意する。
- (8) 各試料のフィルム厚 $t (\text{mm})$ をマイクロメータなどの厚さ計で 0.001 mm の桁まで測定する。厚さのばらつきが少ない場合は、個々の試料すべてについて厚さを測る必要はない。Batch No. 1 の場合、厚さは $0.122 \pm 0.005 \text{ mm}$ の範囲内にあるので、 $\pm 4\%$ 程度の不確定さが許容できる場合は、 0.122 mm を t の代表値として用いてよい。
- (9) 1 Mrad あたりの吸光度変化量で表わされた線量校正定数 $K (\text{Mrad})^{-1}$ を用いて CTA フィルムの吸収線量 $D_c (\text{Mrad})$ を次式により算出する。

$$D_c = \frac{A - A_0}{K} \cdot \frac{0.125}{t} \cdot f \quad (1)$$

ここで、 f は照射後の吸光度の時間的変動に対する補正係数であり、標準的な時間帯（照射後 $1 \sim 3 \text{ h}$ ）で測定する場合は 1 とする。 K の値は電子線照射の場合には $0.063 (\text{Mrad})^{-1}$ を用いる。 γ 線照射の場合は、 10^6 rad/h の線量率における値を一応の基準とし、照射環境の温度および湿度がそれぞれ 25°C および 60% のとき $0.081 (\text{Mrad})^{-1}$ とする。温度および湿度がこれと異なる場合 f の値は Fig. 4 ~ 9 の温湿度依存性の測定結果あるいはそれをもとにして得られた温湿度係数を用いて決定する。Fig. 3 に示すように線量率が 10^6 rad/h より低くなるに従って K 値は多少高くなるが、ここでは簡単のためにそれについての補正是省いた。

4.2 長尺テープを用いた連続測定の手順

- (1) CTA テープを線量分布測定に必要な長さにカットする。複数個使用する場合には試料番号をつける。専用計器 (FDR) を用いる場合には、カットしたテープの長さは必ず 17 cm 以上とする。
- (2) テープに沿う未照射時の吸光度 A_0 の測定は通常省略するが、テープの両端部については、3.1(2) ~ (4) に述べた方法で A_0 を測定しておく。ただし、両端部を直接放射線にさらさないような照射条件がとられる場合は、照射前の A_0 の測定は不要である。
- (3) 試料を照射場あるいは被照射体にセットし、照射する。照射パラメータの選定、環境条件の考慮については 3.1(5) に述べた方法に従う。試料テープ上の位置確認のためにはマー

クを付けると便利である。マーキングは針で軽く傷を付けるのが最適である。別の方を使っている場合は、細芯の油性のマジックペンなどを使用し、テープ面に汚れの付かないよう注意する。このマークは線量算出における厚さ補正にも利用できる。

- (4) 照射後の試料保存については 3.1(6)に述べた方法に従う。
- (5) 専用計器(FDR)を用いる場合は、電源スイッチONの後 30min 以上の予熱時間をおいてから試料ホルダーとして長尺用テープ枠を取り付け、吸光度の零調整を行う。分光光度計を使用する場合は、テープの自動送り機構を試料室に取り付けるか、あるいはマーキングの間隔を適当にとることにより手動でテープを送る方式を工夫する。
- (6) 試料の一方の端より試料ホルダーに送り込み、テープに沿う照射後の吸光度 A の分布を連続的に測定する。出力はペンレコーダーなどで記録する。専用計器(FDR)の場合、ドライブ操作により 10 mm/s のテープ送り速度で連続的に送り込まれる。この測定が終るまでフィルム表面は素手で触れたり、傷をつけたりしないように注意する。
- (7) テープ上のマークの位置付近のフィルム厚 t (mm) をマイクロメータなどで 0.001 mm の桁まで測定する。厚さ測定の必要性については 3.1(8)に述べた通りである。
- (8) CTA フィルムの吸収線量の算出は 3.1(9)に述べた方法に従う。

4.3 付記事項

- (1) リールに巻かれたテープのうち、空気にさらされている部分の吸光度は長期間の保存中に徐々に増える傾向がある。このバックグラウンドの上昇は照射による吸光度の増加分には影響を与えないもので、照射前の吸光度測定を行うかぎり問題はないが、長尺フィルムによる連続測定の場合は、通常照射前の連続測定は行わないので、測定誤差の原因となる。したがって一ヶ月以上保存した後に精密な線量分布測定を行う場合には、空気にさらされている一巻き分のテープを切り捨てて、内側のフィルムを使用するのがよい。保存中はテープの端をフリーにせず、接着テープの小片などでピッタリと巻かれたテープに固定しておく。保存条件としては冷蔵庫など低温乾燥の雰囲気が望ましい。
- (2) 精密な測定を目的とする場合は、照射前後の吸光度測定を出来るかぎり同一に近い条件で行う必要がある。フィルム面上のビームが透過する位置の再現性にも注意を払うべきである。電子線の場合は簡単な遮蔽によってフィルムが電子線照射を受けないようにすることが可能なので、長尺フィルムを用いれば、照射前の吸光度を測定しなくとも、照射後に未照射時の吸光度 A_0 と照射後の吸光度 A を同時に測定することが可能である。遮蔽体の厚さは電子の最大飛程より厚くとる必要がある。遮蔽体内で発生する制動放射 X 線が CTA フィルムの吸収線量に与える影響は通常は無視できる。この方法は同時測定であるので、 ΔA を精密に測定できるが、フィルムに沿う厚さの変動があるので、フィルム上の測定点と遮蔽部位との間隔は短くとるのが望ましい。以上のような精密な測定法によって 1 Mrad 以下の測定も十分可能となる。
- (3) 長尺テープを用いた線量分布測定の場合は、未照射フィルムの吸光度の連続測定は通常行わないので、測定の精密度はフィルム片による測定の場合よりも多少低い。ただしテー

上に適当な間隔でマーキングを行い、各マークの位置で厚さを測り、 ΔA について厚さ補正を行えば、精密な測定ができる。 A_0 に対する厚さの影響は小さいので無視してよい。

- (4) CTA フィルムを積み重ねた試料を電子線で照射し、試料内の線量分布を測定する場合は、照射によってフィルム内の少量の分解生成物が液体状で析出し、重ね合せたフィルムが剥がれにくくなると同時に、フィルム表面が多少汚染し、 ΔA のばらつきの原因となる場合がある。これに対しては、①照射下での試料温度の上昇を抑制するような照射法をとる、②積層フィルムは照射後直ちに一枚一枚バラバラにして保存する、③電子線の吸収特性において等価な他のフィルムと交互に積み重ねた試料を用いるなどの対策によってその影響を最小限に抑える。
- (5) 専用計器(FDR)を用いて長尺フィルムによる連続測定を行う場合は、かららず17 cm 以上の長さのテープを用いる。誤ってフィルム片を挿入すると、フィルムが取り出せなくなり、故障の原因となる。また、折り目のついたテープを用いると、テープの送り動作が不安定になるので、折り目がつかないように注意する。
- (6) 上述の手順で算出された線量は CTA フィルムの吸収線量であることを十分留意しておく必要がある。電子の質量衝突阻止能はプラスチック材料の種類により多少異なるので、吸収線量もそれに応じて異なる。他の物質の線量への換算法は 5 で述べる。
- (7) ここで述べた測定手順はテープ状の CTA フィルムを対象としているが、8 mm巾という CTA テープの寸法が照射や吸光度の測定に不都合な場合は、シート状の CTA フィルムの利用が推奨される。市販されている一枚のシートの大きさは 300 × 350 mm であるので、これから必要な大きさのフィルム片を切り取ることができる。二次元的な線量分布の測定にはシート状のフィルムが有用である。

5. 線量換算法

上に述べた測定手順では線量計の受感体としてのCTAフィルムそのものの吸収線量を算出する段階まで述べた。一般に線量測定では、次の段階として、照射においてセットされたCTAフィルムに密着して、それを囲んでいる異なった物質中のCTAフィルムの位置における吸収線量 D_m を求めることが要求される。このための線量換算法を電子線照射の場合と γ 線照射の場合に分けて以下に述べる。

5.1 電子線照射における線量換算

入射電子の透過距離がCTAフィルムの厚さに比べて十分大きいと仮定すると、異なった物質中あるいはそれに接して置かれたCTAフィルムの位置における周囲物質の吸収線量 D_m は次式で与えられる。

$$D_m = D_c \frac{S_m}{S_c} \quad (2)$$

ここで S_m , S_c はそれぞれ問題としている物質およびCTAの質量衝突阻止能である。主要な物質の質量衝突阻止能はいくつかの表^{9)～11)}に与えられている。表に載っていない化合物や混合物の質量衝突阻止能は元素の重量組成がわかれば、密度効果の補正係数を適当に与えてやることにより算出できる⁹⁾。さらに簡便な概算法としては各構成元素の質量衝突阻止能の重量荷重平均値を求める方法がある。

いくつかの主要物質についての質量衝突阻止能比 S_m/S_c の値をTable 1に示す。この値は電子エネルギーにはあまり依存しないが、全く一定と見なすことはできない。照射された物質内での S_m/S_c の値を厳密に求めるにはCTAフィルムがセットされた位置での電子のエネルギースペクトルを知る必要があるが、これは実際には難しい場合が多い。エネルギースペクトルがわからなくとも、その位置での電子の平均エネルギーがわかれば、 S_m/S_c の値はよい精度で求められる。単一エネルギーの電子線が物質に入射したときの物質内のある深さでの電子の平均エネルギーは電子計算機用の簡単なプログラムとして経験式が与えられている¹²⁾。

さらに粗い近似としては、入射エネルギーから質量衝突阻止能と物質の深さ(g/cm^2)との積を差し引いたエネルギーをその深さにおける平均エネルギーとみなす方法がある。この方法は軽原子番号の物質にのみ適用できるが、実際の平均エネルギーより高めの値を与える。しかし S_m/S_c の電子エネルギー依存性は小さいので、線量値 D_m そのものに与える影響は小さい。

5.2 γ 線照射における線量換算

γ 線およびX線の場合、線量計の受感部に吸収される放射線エネルギーは、受感部の周囲物質内で発生した二次電子（コンプトン電子、光電子など）による寄与と受感体内で発生した二

次電子の寄与が含まれる。前者が支配的な場合、線量換算は二次電子束に対する両物質の質量衝突阻止能比で決まるが、後者が支配的な場合は γ 線に対する両物質の質量エネルギー吸収係数比で決まる¹³⁾。どちらが支配的であるかは受感部の大きさあるいは厚さによるが、⁶⁰Co γ 線に対してCTA線量計を使用する場合は、CTAフィルムの厚さが二次電子の平均飛程に比べて十分に薄いので、周囲物質からの二次電子の寄与が大きく、質量阻止能比によってほぼ決まるとみなされる。したがって電子線の場合と同じ変換式(2)が適用できる。この場合、厳密には受感部のサイズの補正および高エネルギーの二次電子すなわちデルタ線の影響の補正が必要であるが、通常の測定においては不要である。⁶⁰Co γ 線では二次電子のエネルギーを考慮し、Table 1 の 0.3~0.5 MeVにおける質量衝突阻止能比を近似値として用いて差し支えない。

Table 1 Mass collision stopping power ratios relative to CTA, S_m/S_{CTA}

electron energy (MeV)	carbon	Aluminum	Polyethylene	Polymethylmethacrylate (PMMA)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	Polyvinylchloride (PVC)	Water	Air	Iron
0.1	0.935	0.803	1.120	1.034	0.860	0.910	1.065	0.920	0.709
0.2	0.934	0.809	1.116	1.033	0.864	0.914	1.064	0.923	0.720
0.3	0.933	0.814	1.114	1.032	0.869	0.915	1.066	0.926	0.726
0.5	0.932	0.823	1.113	1.031	0.874	0.919	1.072	0.935	0.735
1.0	0.932	0.838	1.110	1.029	0.879	0.926	1.078	0.954	0.750
2.0	0.934	0.858	1.109	1.028	0.884	0.937	1.084	0.982	0.768
3.0	0.935	0.869	1.107	1.028	0.885	0.944	1.086	1.001	0.776
5.0	0.937	0.878	1.107	1.027	0.887	0.952	1.088	1.027	0.788
10.0	0.939	0.882	1.106	1.027	0.889	0.961	1.093	1.064	0.800

6. 線量計の精度

測定値の精度が良いということは正確さ（かたよりの小さい程度 = accuracy）と精密さ（ばらつきの小さい程度 = precision）の両方を含めて総合的に優れていることを意味する。実用線量計の精度は測定値の再現性やばらつきの程度と同義的に使用される場合が多いが、厳密には線量校正や線量換算に伴う正確度を合せそなえたものと理解するべきである。

広い意味で計測の精度（測定結果の不確かな度合 = uncertainty）の良否を左右する要因としては、①測定原理、②測定器および受感部の属性に起因するもの、③放射線側の本質的条件（種類、エネルギー分布、強度、方向分布、時間分布など）、④各種照射パラメータの再現性やシミュレーションに起因するもの、⑤環境条件（温度、湿度、光、周囲物質など）を考えられる。個々の線量計の精度を言及する場合は、直接的には①と②のみを含み、他は多くの場合無視するのが通例である。したがって実際の線量計測における精度を考察する場合、線量計の精度はそのうちの一つの要因に過ぎないことを留意しなければならない。

CTA線量計の精度には多くの要因が考えられるが、各要因毎に精度を厳密に評価することは現在のところ難しい。ここでは、上述の③、④、⑤の要因が無視できるような計測条件を仮定し、電子線照射の場合について、各要因毎に精度の目やすの値を検討してみた。その結果、線量校正に関する精度 $\pm 2 \sim 3\%$ 、吸光度測定の精度 $\sim \pm 2\%$ 、フィルム片の測定値のばらつき $\sim \pm 2\%$ 、フィルム厚測定の精度 $\sim \pm 1\%$ 、照射後の保存時間の差異による不確定さ $\sim \pm 1\%$ 、線量換算に関わる不確定さ $\sim \pm 1\%$ と概算された。以上から総合的な精度を各値の二乗値の総和の平方根としてみなすと、CTA線量計の精度の概算値は $\pm 4 \sim 5\%$ とみなすことができる。

この概算値はCTA線量計を用いた線量計測の精度のミニマムを与えるものであって、実際の計測においては③、④、⑤の要因による影響を十分に考慮しなければならない。とくに γ 線照射の場合は、環境条件や放射線側の本質的条件による不確定さが計測精度の支配的要因になってくる可能性が強い。したがって γ 線照射の場合は $\pm 5\%$ 以下の精度を得るのは難しい。

7. CTA線量計の応用例

7.1 電子線照射における深部線量分布測定

フィルム線量計は透過能力の弱い電子線に照射された物質内の深部線量の分布測定にとくに有用である。深部線量分布測定用の被照射体としてはFig.15に示す3種類のものがよく使用されている。

(A)は線量計のフィルム片をそのまま積み重ねたものであり、受感物質そのものの深部線量分布を与える。飛程が比較的長い高エネルギーの電子線ではフィルム枚数が多くなるので面倒であり、低エネルギーの電子線に適する。積み重ねた試料は両端を固定する必要があるが、この場合中央部が脹らまないように注意する。1 MeV以下の電子エネルギーの場合は積み重ねた試料にそのまま照射しても差し支えないが、CTAテープの巾は8mmしかないので、1 MeV以上の場合には積み重ねた試料の側面の影響が問題になる。この影響を防ぐには、CTAと等価な物質で側面をすきまのないように満たした状態で照射する必要がある。このためには深部線量分布測定用のホルダーがよく用いられる¹⁵⁾。

(B)は測定対象の物質中にCTAフィルムを何枚か挿入したものであり、測定しようとする物質内の近似的な深部線量分布を与える。この場合はCTAフィルムの挿入によって試料内の放射線場を乱さないことが重要であり、CTAフィルムの厚さや巾はその試料全体の寸法に比べて十分に小さくなくてはならない。一つの方法としては試料の巾あるいは大きさを十分に大きくとり、CTAフィルム片を電子線入射方向に揃えることを出来るかぎり避けてずらして配置するように工夫する。この方法は低エネルギーよりも高エネルギーの電子線に適する。

(C)はくさび状の物質内にCTAテープをセットしたものであり、コンベヤなどによる移動照射などにおいて測定しようとする物質内の深部線量分布を与える。この方法はテープに沿う吸光度の分布がそのまま相対的な深部線量分布を示す。くさび状の物質としては薄い板を積み重ねて貼り合せた勾配のゆるやかな段階状のものが製作し易い。セットされたCTAテープの全長にわたって均一の照射が必要であるので、移動照射の場合はビーム電流および移動速度は安定している必要がある。固定照射の場合は電子流密度がくさびの長さにわたって均一ではなくてはならない。くさび形の試料を用いた場合のアルミニウム媒質内の深部線量分布の実測結果の一例をFig.16に示す。深部線量分布には階段状のくさびの不連続な厚さの変化を反映した周期的なパターンが現われている。

7.2 電子線照射における強度分布測定

CTAテープを利用すると、電子加速器のビーム窓下の照射場における電子線の相対的な強度分布が容易に測定できる。通常は軽い原子番号の標準的な試料面上のビーム走査方向およびそれと垂直な方向にテープを固定し、静止条件あるいは移動条件下で照射して相対的な強度分布

あるいは入射エネルギー量の近似的な分布を決定する。これらは同時に試料表面の線量率分布、線量分布も与える。CTA テープを空気中に浮かせて静止条件で照射した場合には、空気の線量率分布を与える。この方法で得られた強度分布は、斜入射の影響を考慮すれば、電子流密度分布に対応する。精密に分布を測定しようとする場合は、4で述べたようにテープ上のマーキングによって厚さの補正を行う必要がある。Fig. 17 に電子線照射場におけるビーム垂直方向およびそれと垂直方向の強度分布の CTA 線量計による実測例をビーム窓からの距離をパラメータとして示す。

7.3 γ 線照射への応用

γ 線照射においては線量率は通常 MR/h あるいはそれ以下であるので、照射時の温度、湿度の影響があるだけでなく、厳密には線量率によって多少 K 値は異なる。これらの影響を十分に考慮した線量値の算出法を用いても、 γ 線の場合は電子線の場合に比べて測定の精度が劣ることは避けられない。したがってとくに正確さが要求される線量測定には適していないが、相対的な線量分布の測定には長尺テープによる簡便な連続測定法が使える点で他の線量計に見られない利点がある。ただし、この方法では、照射のためにセットされた CTA テープに沿う照射中の温度分布が小さいことが望ましい。

γ 線照射で最も注意しなければならない点は電子平衡条件である^{15), 16)}。被照射体内の表面近傍および異なった原子番号の媒質が接する境界面の近傍では電子平衡が成立していないので、 γ 線の減衰の影響を無視しても被照射体の内部の線量率とは異なる場合が多い。これは二次電子のふるまいによるものであり、その影響を正確に予測することは通常困難である。したがってその影響が実測により確かめられている場合以外は、CTA に近い組成をもつ物質を用いて出来るだけ電子平衡を保つ工夫をするべきである。⁶⁰Co γ 線の場合電子平衡厚は $0.4 g/cm^2$ 程度とれば十分である。被照射体特に原子番号の高い金属の表面にそのまま CTA フィルムを貼付することは、以上の理由から物体内部の線量を知ろうとする場合不正確になり易い。一つの対策としてはセットされたテープ上のところどころに $0.4 g/cm^2$ 程度の厚さの等価なプラスチックの小さな 2 枚の板で CTA テープをはさみ、二次電子の影響をチェックする方法がある。

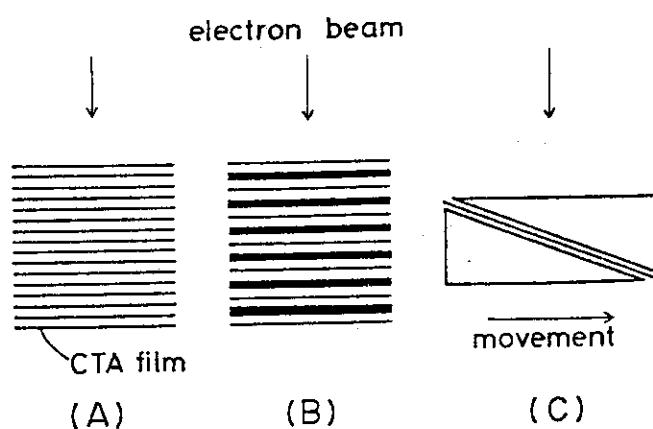


Fig. 15 Irradiation methods for measuring electron depth-dose distribution.

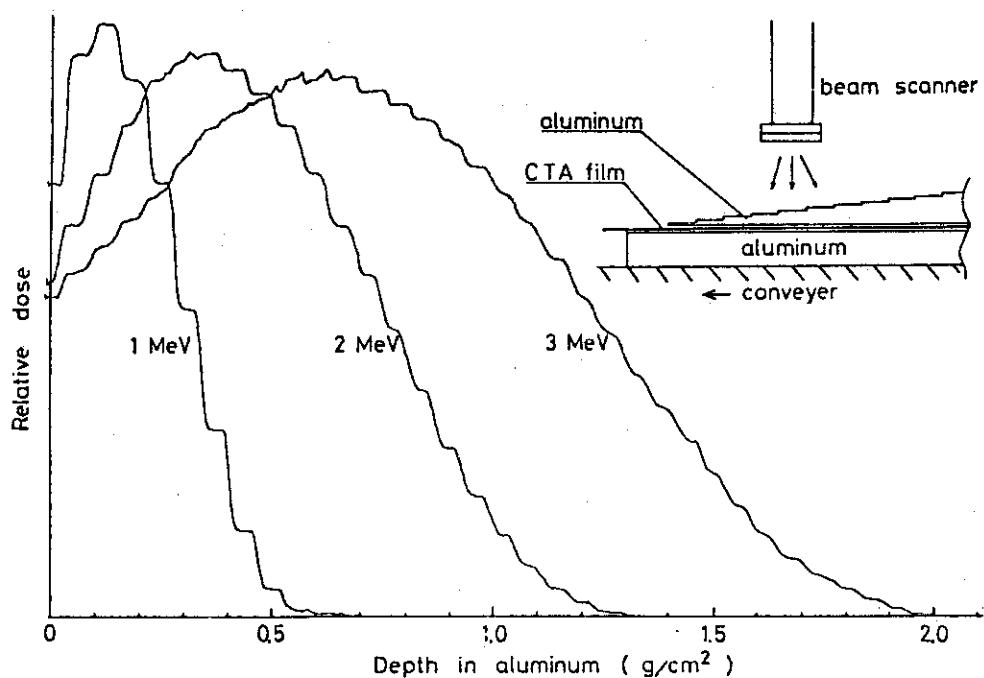


Fig. 16 Depth dose distributions in aluminum obtained with wedge method.

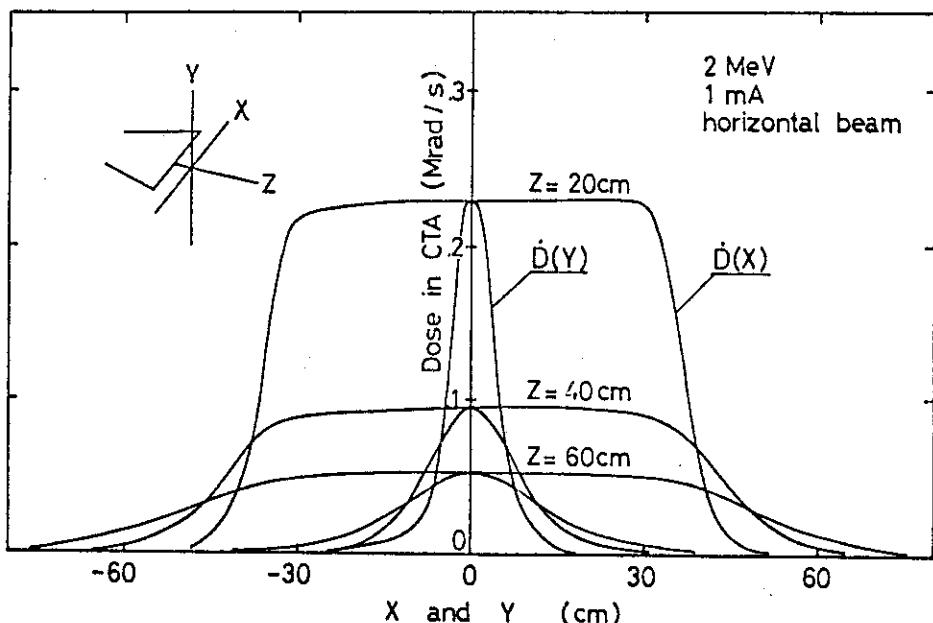


Fig. 17 An example of the beam profiles along and perpendicular to the direction of beam scanning for 2 MeV, 1 mA electron beams from an electron accelerator as measured with CTA dose meter.

8. あとがき

実用線量計については、精密さとともに簡便さが強く期待される。放射線に関する専門家ではない測定者ならずとも、線量計素子を差込むだけで、知ろうとする線量値がデジタル表示ですばりと出てくることを望む。フィルム線量計などの場合、フィルムを照射して吸光度を測るだけであり、面倒な操作を要しないという点で、簡便性においてはまさに理想的であり、誰でも手軽に扱うことができる。

しかし、ある条件下で一つの線量値が決まるまでには、直接的、間接的に数多くの要因が関与している。単に線量計素子や計器に関連するものに限らず、放射線自体、照射パラメータ、環境パラメータなど線量計とは直接関係のないように見える要因も重要である。この理由は、多くの線量計測では、実際に問題としている照射条件と計測のために用意された照射条件とは全く同一でない場合が多いからである。したがって線量計測においては線量計の取扱いを正確に行うとともに、知ろうとする線量値に関連する諸要因の検討を十分に行う必要がある。決められた操作手順の単純な繰返しのみを習得してしまうと、肝心な諸要因との関係を見落しがちになり、パラメータが変化した場合に適切に対応できなくなる。操作の簡便さがかえって線量計測の不正確さを助長することにならないようにしなければならない。

ここに書かれたマニュアルは本研究所での約10年間の使用経験に基づいたものであるが、研究機関での使用条件は限られており、十分に広い使用条件をカバーしているとは言えない。また独立したマニュアルとして公開するのは初めての経験であるので、使用者にとって十分利用し易いスタイルになっていないかも知れない。これらの問題については、利用者の今後の使用経験に基いて改善していきたい。

線量校正のうち、とくに電子線の場合については、方法が技術的に確立していないばかりでなく、 γ 線の場合も含めて、標準的な照射雰囲気の設定については、全く議論がなされていない段階である。この種の環境条件の影響を受け易い線量計については、各照射施設での使用環境ごとに校正することが推奨されていたが、線量校正是面倒な作業であるので、実施可能な機関は極めて限定される。このため、本報告書では当研究所での校正結果をそのまま示した。線量校正法の統一化、基準化は今後の課題である。

ここに述べた線量計の特性は最初の製造バッチについてのものである。基本的な特性はバッチによっては変わらないと考えられるが、線量校正定数、フィルムの厚さの平均値とそのばらつき、および照射前の吸光度の値はバッチが変わることに多少変動することが考えられる。また、同一バッチについても、長期間の保存中に特性が一定に保持されるかどうか、定期的な再校正などによって今後継続的に調べていく予定である。

謝 辞

CTA線量計の取扱いに関しては、これまで所内外の多くの方々から有益な助言や示唆を頂いており、本マニュアルはそれらを十分に考慮して作成した。とくに大阪研究所の永井士郎副主任研究員からCTA線量計の化学的機構に関する重要な示唆を頂いた。また鷲野正光照射施設課長をはじめとする数多くの照射施設課員から照射技術面での助言を頂くとともに、取扱い方法に関する議論に加わって頂いた。これらの諸氏に謝意を表する。またCTAフィルムの提供と取扱い上の有用な知見を頂いた富士写真フィルム株に感謝する。

参 考 文 献

- 1) R.Tanaka, K.Yotsumoto, K.Mizuhashi and N.Tamura ; Manual on CTA Film Dosimeter (1977) 内部資料
- 2) N.Tamura, R.Tanaka, S.Mitomo, K.Matsuda, and S.Nagai ; Radiat. Phys. Chem., 18, 947 (1981).
- 3) 松田光司, 永井士郎 ; JAERI-M 8471 (1979)
- 4) 田中隆一, 三友昭市, 水橋清, 田村直幸 ; 理工学における同位元素研究発表会要旨集 P. 51 (1979)
- 5) R.Tanaka, H.Sunaga, K.Yotsumoto, K.Mizuhashi and N.Tamura ; Radiat. Phys. Chem., 18, 927 (1981)
- 6) 須永博美, 田中隆一, 理工学における同位元素研究発表会要旨集 P. 141 (1981)
- 7) W.L.McLaughlin, J.C.Humphreys, B.B.Radak, A.Miller, and T.A.Olejnik ; Radiat. Phys. Chem., 14, 535 (1979)
- 8) Manual of Food Irradiation Dosimetry (IAEA, Technical Reports Series No. 178) IAEA, Vienna (1977)
- 9) M.J.Berger and S.M.Seltzer ; NASA-SP 3012 (1964) and NASA-SP 3036 (1966)
- 10) L.Pages, E.Bertel, H.Joftre and L.Sklavenitis ; CEA-R-3942 (1970)
- 11) 杉山治男 : 電子技術総合研究所調査報告第 170 号 (1971)
- 12) T.Tabata and R.Ito ; Nucl. Sci. Eng. 53, 226 (1974)
- 13) T.E.Burlin ; Manual on Radiation Dosimetry (N.W.Holm and R.J.Berry, eds.) P. 13, Marcel Dekker, Inc., New York, (1970)
- 14) 日本工業規格, 計測用語 JIS Z 8103-1978
- 15) 大線量測定研究委員会編, 大放射線量実用測定法, 放射線照射振興協会 (1978)
- 16) 田中隆一, 金子広久, 田村直幸 ; 理工学における同位元素研究発表会要旨集 P. 60 (1980)