

# 熱ルミネセンス線量計を 用いた環境 $\gamma$ 線量測定法

平成2年改訂

文 部 科 学 省

## 放射線審議会測定部会の委員及び専門委員

委員(部会長)	浜 田 達 二	社団法人 日本アイソトープ協会
	池 田 長 生	社団法人 日本アイソトープ協会
	市 川 平 三 郎	国立がんセンター
	柏 木 寛	電子技術総合研究所
	阪 上 正 信	元 金沢大学
	佐 藤 孝 平	電子技術総合研究所
	鈴 木 郁 生	国立衛生試験所
	谷 村 顕 雄	国立衛生試験所
	団 野 皓 文	南九州大学
	敦 賀 花 人	財団法人 海洋生物環境研究所
	浜 口 博	財団法人 日本分析センター
	山 県 登	元 国立公衆衛生院
専 門 委 員	阿 部 史 朗	放射線医学総合研究所
	石 川 友 清	財団法人 セコム科学技術振興財団
	岡 野 眞 治	元 理化学研究所
	葛 城 幸 雄	元 気象研究所
	小 林 宏 信	元 農業環境技術研究所
	塩 崎 愈	海上保安庁
	原 禮 之 助	セイコー電子工業株式会社

本書の作成にあたっては、上記委員のほか次の方々の協力を得た。

岡 井 富 雄	九州大学
加 治 俊 夫	九州大学
加 藤 朗	財団法人 日本保安用品協会
白 石 直 典	財団法人 九州環境管理協会
高 島 良 正	九州大学
中 島 敏 行	放射線医学総合研究所
松 岡 信 明	財団法人 九州環境管理協会
百 島 則 幸	九州大学

(敬称略・五十音順)

# 目 次

第1章 序 論	1
第2章 用語の説明	2
第3章 環境モニタリング用TLD	4
第4章 TLDの設置	6
第5章 測 定	9
第6章 校 正	11
第7章 測定結果の評価	16
解説1 TLDによる環境 $\gamma$ 線量測定における一般的事項	22
解説2 使用TLDとその特性	24
付録1 自己照射線量と宇宙線の寄与	31
付録2 フェーディングの補正	32
付録3 正規分布適合度の検定	35
付録4 等分散検定	36
付録5 $\gamma$ 線エネルギー情報の把握	46

# 第1章 序 論

「熱ルミネセンス線量計を用いた環境 $\gamma$ 線測定法」は昭和57年に作成されて以来8年を経過したが、その間、J I S Z4327「環境 $\gamma$ 線モニタリング用熱ルミネセンス線量計測定装置」が昭和59年に制定され、また昭和58年度の委託研究の成果として、T L Dによる $\gamma$ 線エネルギー情報の把握のためのデータが得られている。また、昭和55年以来実施されている各測定機関の間のクロスチェックでの経験から、現行マニュアルの修正すべき点も明らかとなってきた。以上のような理由から、改訂が必要となった。

改訂した主な個所は、

- ① 第2章用語の説明は、J I Sに用いられている用語も加えて対比させたこと、
- ② 第4章において、収納箱中のT L Dの配置、素子のクリーニング、リーダの感度変化、プレドーズ対策に関し書き加えたこと、
- ③ 付録1において、対照用T L Dの意義を従来より強調したこと、
- ④ 上述した $\gamma$ 線エネルギー情報把握について付録5を新しく設けたこと、

である。

なお、平成元年3月に「環境モニタリングに関する指針」が改正され、空間放射線の計測量は原則として空気吸収線量（単位G y）とすることとなった。本マニュアルでは従来からの照射線量（単位R）を引続き用いているが、係数 $8.7 \times 10^{-3}$ を乗ずることによって空気吸収線量に換算することができる。

## 第2章 用語の説明

熱ルミネセンス 線量計測装置	熱ルミネセンスを測定することにより放射線量を計測する機器の組み合せ全体をいう。通常、リーダ、TLD、リーダプリンタ等から構成されている。
TLD	素子をホルダに収納したもの。JISでは「線量計」と表記されている。
素子	熱ルミネセンス物質を細いガラス管に封入したもの、または成型したもの。
ホルダ	1個または複数個の素子を収納する容器。使用上の便宜、素子の保護およびエネルギー特性の改善を目的としたもの。
リーダ	素子を加熱し、熱ルミネセンスを計測し、線量で指示する装置。
アニーリング	加熱により素子を放射線照射以前の状態にもどすこと。
フェーディング	放射線に照射された素子の熱ルミネセンス量、すなわち線量指示値が時間の経過とともに減少すること。JISでは、「レスポンスの経時変化」という用語で表現されている。
ブレドーズ	アニーリング直後の素子をリーダにより測定するとある程度の線量が指示されることがある。この指示値をいう。JISでは、「ゼロ照射指示値」となっている。
自己照射	TLD（素子およびホルダ）に含まれる放射性物質により素子が受ける照射。
対照用TLD	モニタリング期間中比較のため鉛容器内に収納しておくTLDをいう。モニタリング期間中の自己照射、宇宙線等による線量を確認することを目的とするもので、本マニュアルにおいては、その線量値は参考値として扱う。
直線性	測定量と測定器指示値との間の比例性、または測定量に対するレスポンス（あるいは校正定数）の一定性をいう。
エネルギー特性	放射線計測器のレスポンスまたは校正定数が放射線のエネルギーに依存する性質をいう。
方向特性	放射線計測器のレスポンスまたは校正定数が放射線の検出器に対する

	入射方向に依存する性質をいう。
測定地点	TLDの収納箱を設置する場所。
校正	基準 $\gamma$ 線源, または基準の測定器を用いて定められた基準の値とモニタ等計測器の指示値との関係を求めること。
標準照射	熱ルミネセンス線量計装置の校正, TLDのばらつきの確認等のため, 基準 $\gamma$ 線源等によりTLDに一定線量を照射すること。
精度	計測器の表わす値または測定結果の正確さと精密さを含めた総合的なよさ。
正確さ	かたよりの小さい程度。
精密さ	ばらつきの小さい程度。
かたより	測定値の母平均から真の値を引いた値。
ばらつき	測定値の大きさがそろっていないこと。またふぞろいの程度。
再現性	同一の方向で同一の測定対象を, 測定者, 装置, TLDの読取場所, 読取時期のすべて, またはいずれかが異なった条件で測定した場合, 個々の測定値が一致する性質または度合。
レスポンス	リーダの指示値と測定すべき量との比で, ふつう, 感度といわれる。感度には感度限界の意味も含まれ, まぎらわしいのでレスポンスという。校正定数の逆数である。

### 第3章 環境モニタリング用TLD

環境 $\gamma$ 線のモニタリングに使用されるTLDがさらされる環境条件等は次のようなものである。

- (1) 環境 $\gamma$ 線は数10keVから数MeVの範囲にわたる連続スペクトルをもつが、線量率への寄与は3MeV以下が大部分である。
- (2) モニタリングには複数個のTLDを決められた測定地点に3か月程度設置しておく。その間の線量は、地域および設置場所により異なるが、おおむね10~40mR程度である。
- (3) TLDは温度変化の大きいきびしい自然環境におかれる。

さらに

- (4) モニタリングには相当個数のTLDを配置するが、それらに共通した校正定数を適用することが一般的である。

モニタリングに際しては、上記の条件から次の特性に注意しなければならない。

- (i) 直線性
- (ii) エネルギー特性
- (iii) 方向特性
- (iv) フェーディング
- (v) ばらつき
- (vi) 自己照射

これら特性のうちで、特にばらつき、フェーディング、自己照射の小さいことが必要である。そのほか、くり返し使用によりTLDのレスポンスに変化をきたさないこと、リーダの安定度は短期、長期のいずれにおいても優れていることも必要となる。

なお、本マニュアルは、JISに規定された性能を満足する機器を使用することを前提にして作成されている。

第3.1表に現在、環境 $\gamma$ 線のモニタリングに実用されているTLDの種類を示す。

特性が測定結果におよぼす影響の判定には、実験室における試験データのみならず、種々の環境条件で使用した場合のデータもまた重要である。そのため、各種のTLDを相当数使い、実際に数か所の測定地点に設置して測定を行った。また、TLDを地表に対し水平と垂直に設置した場合の測定結果についても検討し、これらの結果を解説2に示した。

これらの結果から、現在、環境 $\gamma$ 線のモニタリングに実用されている代表的な種類のTLDについては、次のようなことがいえる。

- (1) 環境モニタリングにおける同一ロットのTLDの読取値のばらつきは、変動係数で表わして4～5%程度である。なおロット間のばらつきは、これより大きいことがある。
- (2) 日常の環境 $\gamma$ 線モニタリングではエネルギー特性、方向特性およびフェーディングについての補正は行わなくてもよい。
- (3) TLDの設置方向は地表に対し任意でよい。

第 3.1表 環境 $\gamma$ 線のモニタリングに用いられているTLD

熱ルミネセンス物質	型 式	備 考
$\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$	2素子ホルダ入り	熱風加熱式
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 : \text{Tb}$	〃	熱板加熱式
$\text{LiF} : \text{Mg, Cu, P}$	〃	〃
$\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$	3素子ホルダ入り	光加熱方式
$\text{CaF}_2 : \text{Dy}$	1素子バルブ型	直接加熱式

## 第4章 TLDの設置

### 4.1 測定地点

原子力施設等周辺の人の住んでいるところでの線量を測定することが、TLDによる環境 $\gamma$ 線のモニタリングの大きな目的のひとつであるので、

- (1) 施設周辺の集落には、施設を中心としてできるだけまんべんなく測定地点を設けること、
  - (2) 測定地点での値が、周囲の代表的な値になるよう、気象上や地質上の条件を考慮して測定地点を選ぶこと、
  - (3) 測定地点は、その周囲の環境条件が将来にわたって大きく変わらないような場所であること、
- 等に留意して、測定地点および設置場所を選定すべきである。

### 4.2 収納箱

- (1) TLDは、温度40℃、3か月で5～10%のフェーディングを示す。  
密閉式の収納箱では、夏期にこの程度の温度は十分予想されるので、通風性をよくしたり、断熱材を収納箱の内側に張るなどの工夫が必要である。
- (2) 特別の目的がないかぎり、収納箱は $\gamma$ 線に対するしゃへい効果の少ない材料で製作しなければならない。第4.1図にその一例を示す。
- (3) 収納箱の地上高は、1.0～1.5mの範囲内で一定にすることが望ましい。

### 4.3 素子

- (1) 素子は、1測定地点に6素子以上、リーダ校正用素子は10素子以上用いなければならない。

全所要素子数は、測定地点数をN、予備素子数をAとすると

$$\text{所要素子数} \geq (6 \times N \times 2)^* + 10 + A \quad (* \text{交換用})$$

となる。

- (2) モニタリング用TLDとリーダ校正用の標準照射したTLDは、同一ロットであるかあるいは相対レスポンスが既知のものを用いなければならない。

### 4.4 収納方法

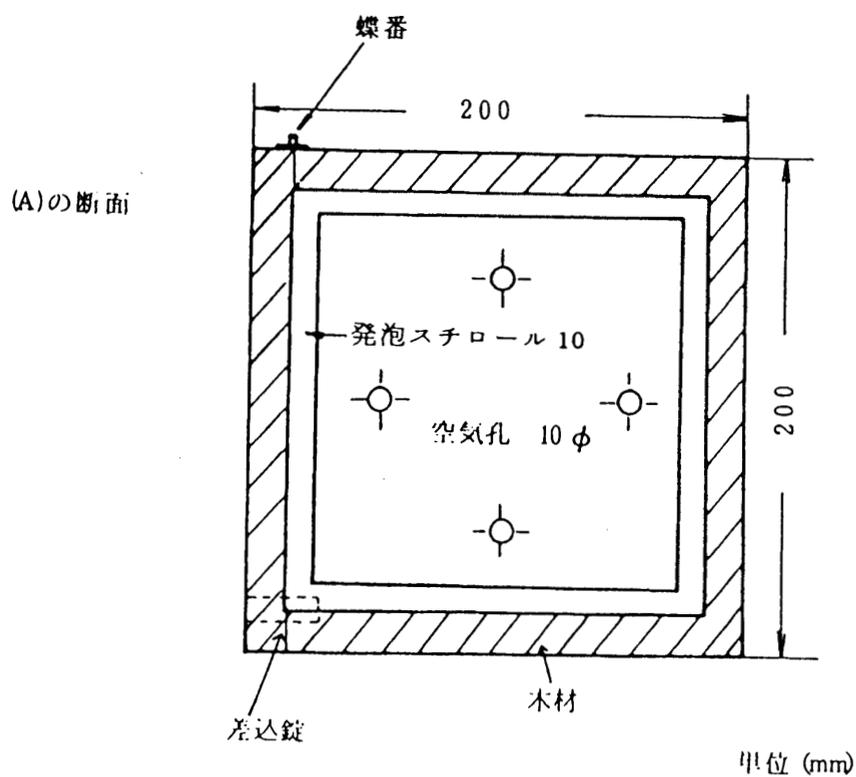
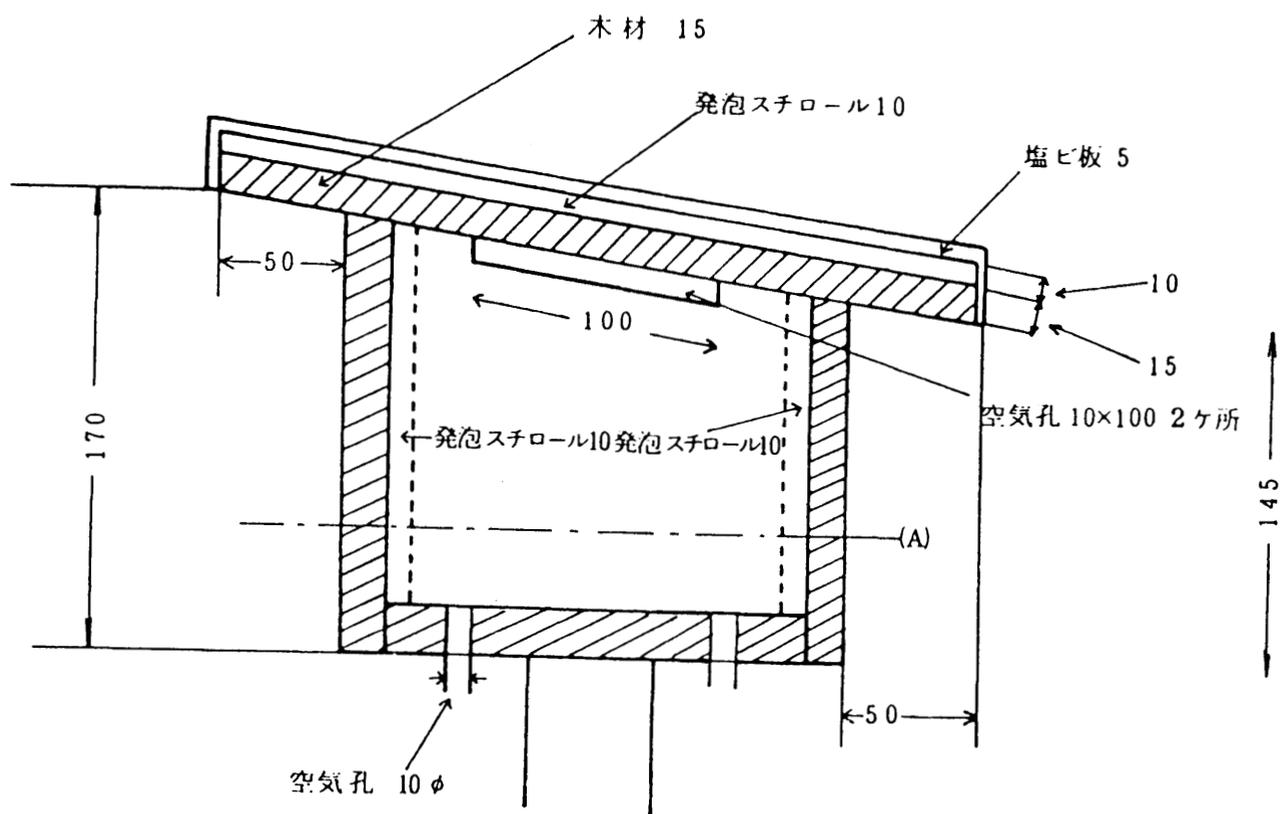
- (1) 環境 $\gamma$ 線の場合、かつ上記のような収納条件では、TLDは有意な方向特性を示さないため、TLDの収納箱内での方向は地表に対し、水平、垂直のいずれでもよい。

しかしながら、TLD同志が互いにしゃへい物とならないように、ある程度の間隔をあけて配置した方が良い。

- (2) TLDは、ポリ袋あるいはポリ容器に入れ測定地点名、測定期間を明示しておき、交換時に役にたつようにする。

#### 4.5 運 搬

アニーリング終了から現場配置まで、および回収から読み取りまでにTLDの受ける線量は、設置期間中の線量に上のせになる。これらの線量が設置期間中の線量に対し無視できるよう、配布、回収時間を短縮したり、運搬容器をしゃへいしたりすることが望ましい。



第 4.1 図 収納箱 (一例)

## 第5章 測 定

### 5.1 前処置

(1) 熱ルミネセンス物質がガラス管に封入されている素子の場合、ガラス表面の汚れにより擬似信号を生じるので、高純度エタノール（試薬1級）に浸したガーゼで拭いて汚れをとったのち、よく乾燥する。\* ただし、必要以上のクリーニングはガラスを傷つける原因となるので注意すること。むしろ、ガラス部分に手を触れないようにすることが肝腎である。

\* エタノールが残留していると擬似信号の原因となるから、照射した素子についてはさらに蒸留水に浸したガーゼで拭ってから乾燥するとよい。

(2) 感光性があるために誤差を生じうる素子の場合、一連の操作を遮光して行わなければならない。

### 5.2 リーダ

(1) リーダの校正は、標準照射したTLDで測定のとど行う必要がある。

(2) 照射線量とリーダ読取り値の間に零を通る直線関係が成立することがわかっている場合、環境における測定値に近い線量による1点校正で十分である。零点を通らないが直線関係の保証されている場合、2点または3点校正が必要である。

(3) 3か月ごとの環境測定にだけしかリーダを使用しない場合、リーダの安定化のためには測定直前のウォーミングアップだけでは不十分なので、使用2～3日前ぐらいから測定操作をくりかえしておく必要がある。

(4) 一連の測定はなるべく継続して行うほうがリーダの安定性を保つ点で有利であるが、一方、リーダの温度上昇が原因と思われる感度低下も認められている。その対策としては、標準照射したリーダ校正用TLDを一連の測定の間隔に適切な間隔で入れることも一つの方法である。

(5) リーダの定期点検は、少なくとも年1回行うのが望ましい。

### 5.3 各種の補正

現在、環境 $\gamma$ 線のモニタリングに実用されているTLDの場合、日常のモニタリングではリーダの校正が確実であれば特別の補正を必要としない。しかし、高い精度を要するような場合、各種の要因について補正が必要である。これら要因にはエネルギー特性、自己照射、フェーディング等があるが、もっとも影響の大きいとみられるフェーディン

グについて補正方法を付録2に示した。

#### 5.4 測定期間

測定期間は1月～3月，4月～6月，7月～9月，10月～12月の各3か月を原則とする。

#### 5.5 素子のアニーリング

- (1) 素子は使用する前に汚れがないことを確認したのち，専用の電気炉で所定の温度および時間でアニーリングを行う。
- (2) アニーリングが完了後，リーダでプレドーズを確認する。
- (3) プレドーズが異常に高い値を示す素子は，素子をクリーニングして再度アニーリングを行い，プレドーズを確認する。
- (4) 素子に汚れがないにも拘らずプレドーズが高い素子に対しては，メーカーの指定する温度より少し低い温度でやや長時間アニーリングを行うと良いと言われている。（指定以上の温度でのアニーリングは，感度の低下を来たすおそれがある。）

## 第6章 校 正

### 6.1 校正の必要性

熱ルミネセンス線量計測定装置はメーカーにおいて製作後、調整、校正され、リーダ内蔵感度調整用光源によりレスポンスをほぼ一定に保つことができるようになっている。しかし、環境 $\gamma$ 線のモニタリングはその結果に高度の信頼性と統一性が要求されるので、これを保証するために標準照射したTLDを用い、測定のとど校正することが必要である。

### 6.2 標準照射用基準 $\gamma$ 線源

TLDの標準照射は通常、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{60}\text{Co}$ のいずれかの基準 $\gamma$ 線源により行う。

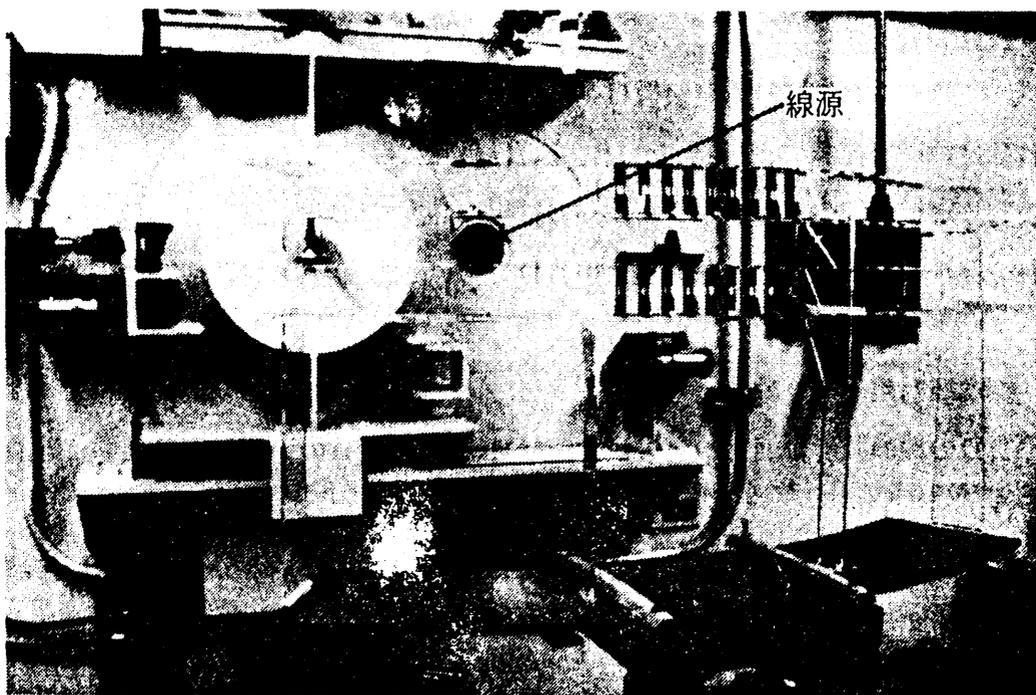
放射能は50MBqから500MBq程度のものが一般的であるが、3.7MBq程度のもので使用することができる。

### 6.3 標準照射

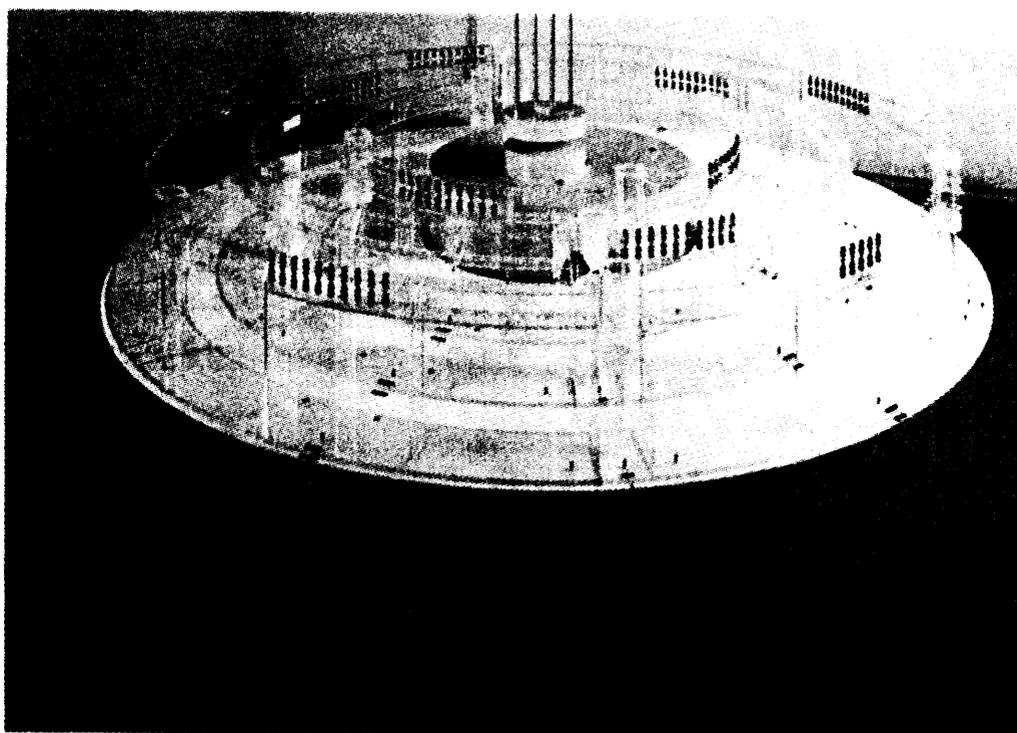
標準照射の方法は、線源配置のしかたから、次の二つの方法に大別される。一つ第6.1図Aに示すように線源を鉛容器に格納し $\gamma$ 線をビーム状とし、シャッタ（容器のふた）を開閉することにより希望する線量になる時間TLDを照射する。他は同図Bに示すように、線源を下部容器から突き出すか、 tong等により中心に設置し周囲においたTLDを希望の線量となる時間、照射する。Aの場合、しゃへいが容易であるが同時に照射できるTLDの数はビームの広がりにより限定される。Bの場合、一時に相当個数が照射できる。この場合、照射の一様性を確保するため線源の周囲にセットしたTLDを低速で回転させることも行われている。線源が高放射能である場合Aとすることが多い。照射を行う場所は広い方が望ましく、少なくとも線源、TLDともに壁、床、物品などの散乱体から1m以上離すべきである。JIS Z4511“照射線量測定器の校正方法”を参考とするのがよい。

なお、標準照射はTLD校正のみならず、TLDのばらつきの確認、フェーディングの確認等にも利用できる。また、標準照射は適切な機関に依頼することもできる。

A ビーム方式



B 突き出し方式



第 6.1 図 TLD 標準照射の方式

#### 6.4 標準照射の線量

環境 $\gamma$ 線のモニタリングにおける、設置期間（3か月）の線量は10~40mR程度であることから、標準照射線量は30mR前後にとられることが多い。500MBq程度の $^{137}\text{Cs}$  $\gamma$ 線源により線源から50cmの箇所にTLDを設置すると、照射時間は3時間程度となる。3.7MBqの場合は、30cmの所におくとしても約100時間となる。3.7MBqの線源であると数100MBqオーダのものに比し照射時間は格段に長くなるが、線源の取扱いが容易で利用しやすい。この場合、バックグラウンド線量に注意し、その影響が大であれば補正をしなければならない。

#### 6.5 標準照射に用いるTLDの個数と設置

校正には、10素子以上を用いる。TLDをアクリル樹脂等で軽量に作られた枠にかけ、TLDの中心軸に対し垂直方向から $\gamma$ 線を照射する。TLDの中心点における線量率を標準照射の線量率とする。

#### 6.6 校正定数の決定

##### (1) 1点校正の場合

線量率を $\dot{X}$ 、照射時間を $t$ とすると標準照射線量 $X$ は、

$$X = t \dot{X} \quad (6.1)$$

となる。複数個の素子の読取値の平均値を $Q$ とすると、TLDの校正定数 $K$ は、

$$K = \frac{X}{Q} \quad (6.2)$$

で求められる。

エネルギー特性などは、レスポンスをとって表わされることが多い。レスポンス $R_p$ は校正定数の逆数で、

$$R_p = \frac{Q}{X} \quad (6.3)$$

で与えられる。

校正場所におけるバックグラウト線量の影響が無視できないときは、補正を行わなければならない。すなわち標準照射時間におけるバックグラウンド線量（別に測定しておく）を $Q_b$ とすると、校正定数 $K$ 、レスポンス $R_p$ は、それぞれ次式で与えられる。

$$K = \frac{X}{Q - Q_b} \quad (6.4)$$

$$R_p = \frac{Q - Q_b}{X} \quad (6.5)$$

なお、参考として次式により一素子あたりの変動係数CVを求めておくといよい。

$$CV = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{\sum (Q - Q_i)^2}{n - 1}} \quad (6.6)$$

ここで、 $Q_i$  : 個々の素子の指示値、 $n$  : 素子数、である。

## (2) 複数点校正の場合

標準照射線量を  $X_i$ 、それぞれの読取値の平均値を  $Q_i$  とする。 $X_i$  としては10～40mRの範囲で3点以上とることが必要である。

( $Q_i, X_i$ ) の一次回帰を取り、次式を得る。

$$X = a \cdot Q + b \quad (6.7)$$

$a, b$  : 定数

(6.7)式は、リーダ校正用の直線関係である。

環境におけるTLDの読取値の平均値を  $Q_p$  とするとき、 $Q_p$  を(6.7)式の  $Q$  に代入して、そのときの環境における照射線量  $X_p$  を得ることができる。

なお、校正場所におけるバックグラウンド線量が無視できないときの取り扱いは、6.6(1)と同様である。すなわち( $Q_i - Q_b$ )を読取値の平均値とすればよい。

## 6.7 直線性

環境  $\gamma$  線のモニタリングにおける線量範囲では“線量-読取値”の直線性(レスポンスの一定性)についてはまず問題ないと思われが、一応確認しておくべきである。複数個のTLDを何組か用意し、線量率既知の一定の場所で、それぞれをたとえば5, 10, 20, 40, 80mRといった線量になるように標準照射する。使用する素子数は、それぞれ6素子程度とする。各線量における素子読取値の平均値をとりレスポンスを求める。横軸に線量を、縦軸にレスポンスをとりその一定性をみる。各点についての校正定数を求め、それらの平均値をTLDの校正定数とすることも行われている。

## 6.8 逆二乗法則

標準照射用基準  $\gamma$  線源について、距離  $L$  と一定照射時間あたりの線量との関係をとっ

ておくとよい。複数個の素子をたとえば線源から30, 50, 70, 100, 150cmといった場所におき、それぞれ十分測定可能な線量となる時間、照射する。素子数はそれぞれ6素子程度とする。

(6.1)式に従って線量を決定し、一定時間(たとえば1時間)あたりの線量 $X$ を求める。

横軸に $L$ を縦軸に $XL^2$ をとってグラフとする。 $XL^2$ が $L$ に対して一定であるならば線量率は距離の逆二乗法則に従っていることになる。これにより逆二乗法則との一致の程度を確認することができる。各点について(6.6)式による変動係数を求めておく。

## 第7章 測定結果の評価

### 7.1 概説

ある測定地点の、ある測定期間中の積算線量 $X$ を評価する場合、まず測定値 $X$ そのものの精度について、十分知っておかなければならない。

次に、この積算線量 $X$ が有意な増減を示しているかどうかを判断する。

以上の観点から、測定から評価までの過程はほぼ次のようになる。

- (1) ある期間、ある地点の測定値（通常6素子）のうちに異常値があるかないか調べる。  
異常値があれば以後の計算処理のための数値群から除く。
- (2) 異常値を除いた数値群から、その測定地点の3か月値 $X$ をもとめる。
- (3) 3か月値 $X$ と、その測定地点のバックグラウンド線量 $X_B$ との比較を行う。なお、ここでいうバックグラウンド線量とは原子力施設運転以前に測定した線量のみでなく、運転開始以後においても、他のデータからその施設がTLDに対して有意な線量変化を与えていないと判断された場合、それら運転以後の線量測定結果も含めたものである。

各項目の具体的な方法について、以下に述べる。

### 7.2 異常値の棄却法

異常値の棄却法について、測定精度に関する情報がない場合とある場合とに分け、前者についてはt分布検定とGrubbsの方法、後者についてはASTM: E 178-61Tの方法をそれぞれ説明する。

#### 7.2.1 測定精度に関する情報がない場合

##### (1) t分布検定

異常値と考えられるものを $X_0$ 、他のものを、 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ とする。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (7.1)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (7.2)$$

を求める。

(7.1)式, (7.2)式および $X_0$  から,

$$t_0 = \frac{|X_0 - \bar{X}|}{\sqrt{S^2 \frac{n-1}{n}}} \quad (7.3)$$

を求める。

有意水準 $\alpha$ を定め, 自由度 $\Phi = n - 1$ の $t(\Phi, \alpha)$ 付第1表から,  $t_\alpha$ 値を求める。 $\alpha$ の値としては0.05または0.01ととるのが一般的である。

$$t_0 \geq t_\alpha \quad (7.4)$$

ならば $X_0$ を異常値として棄却する。

## (2) Grubbsの方法

$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$ という値があり,

(i) 疑わしい値が $X_1$ であるとき,

$$T_1 = \frac{\bar{X} - X_1}{\sigma_{\bar{X}}} \quad (7.5)$$

(ii) 疑わしい値が $X_n$ であるとき,

$$T_n = \frac{X_n - \bar{X}}{\sigma_{\bar{X}}} \quad (7.6)$$

$T_1$ ,  $T_n$ をそれぞれ計算する。ここで,

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (7.7)$$

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (7.8)$$

この $T_1$  または $T_n$ が, 付第2表の棄却限界値以上ならば,  $X_1$  または $X_n$ は有意水準 $\alpha$ で捨てることができる。なお, この表は片側検定の棄却限界を与えている

ので、異常値が高い値（ $X_n$ ）にでるか低い側（ $X_1$ ）にでるか分からないときには、付第2表において、採用した $\alpha$ の値の $1/2$ （たとえば $\alpha=0.05$ ならば $0.025$ ）の欄の数字を読まなければならない。

### 7.2.2 測定精度に関する情報がある場合

別の実験から求めた測定精度が、問題としている一群のデータの分析精度と差がないという条件が満たされるとき、この方法を使うことができる。

ASTM: E178 -61Tの方法

$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$ となる値があり

(i) 疑わしい値が $X_1$ であるとき

$$T'_{1} = \frac{\bar{X} - X_1}{\sigma_e} \quad (7.9)$$

(ii) 疑わしい値が $X_n$ であるとき

$$T'_{n} = \frac{X_n - \bar{X}}{\sigma_e} \quad (7.10)$$

$T'_{1}$ ・ $T'_{n}$ をそれぞれ計算する。ここで、

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (7.11)$$

$\sigma_e$ は、別の実験から求めた測定精度であり、その時の自由度を $\phi_e$ とする。

$T'_{1}$ 、または $T'_{n}$ の値が付第3表のASTM: E178 -61Tの棄却限界表の値を越えていれば、 $X_1$ 、または $X_n$ は有意水準 $\alpha$ で棄却される。

## 7.3 評価の方法

### 7.3.1 3か月値 $X$ の求め方

設置期間終了後、TLDを回収する。回収されたTLDおよび標準照射したリーダ校正用TLDの読み取りを行う。校正用TLDから校正定数 $K$ が決定される。校正定数 $K$ はTLDすべてに共通の値となる。なお、フェーディングの補正は必要ないとする。回収されたTLDの素子数を $n$ 、校正用TLDの素子数を $m$ 、前者の読取値を $Q_1 \sim Q_n$ 、後者のそれを $Q_{1k} \sim Q_{mk}$ とし、次式によりそれぞれの平均値

を求める。

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \quad (7.12)$$

$$\bar{Q}_k = \frac{\sum_{i=1}^m Q_{ik}}{m} \quad (7.13)$$

ただし、読取値の中に異常値がある場合 7.2に示したいずれかの方法で棄却を行った後平均値を算出する。

校正用 TLD に標準照射した線量を  $X_k$  とすると、校正定数  $K$  は

$$K = \frac{X_k}{\bar{Q}_k} \quad (7.14)$$

設置期間を  $t$  (日)、規格化の日数を  $T$  ( $T=90$ 日,  $91$ 日または $92$ 日) とすると、3か月値  $X$  は

$$X = \frac{T}{t} \cdot K \cdot \bar{Q} \quad (7.15)$$

### 7.3.2 3か月値 $X$ とバックグラウンド値 $X_B$ の比較

ある測定地点での一定期間における線量は、特殊な事情、たとえば地表の状況の変化とか大量の降雪とかかかないかぎり季節および年によらず一定であるとする、3か月値  $X$  とその測定地点のバックグラウンド値  $X_B$  とを比較することで線量の増減を判断できることになる。3か月積算線量を基本のデータにするかぎり、現在の TLD による環境  $\gamma$  線のモニタリングの精度では、線量はほぼ一定であると考えてよい。

ある測定地点  $P$  の、ある3か月  $i$  の積算線量を  $X_{pi}$  とする。

原子力施設の影響を受けていないときに3か月間の線量を  $n$  回測定しておけば、測定地点  $P$  のバックグラウンド線量  $\bar{X}_{PB}$  は

$$\bar{X}_{PB} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{pi}}{n} \quad (7.16)$$

また、 $X_{pi}$ の標準偏差 $\sigma_p$ は、

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_{PB} - X_{pi})^2}{n-1}} \quad (7.17)$$

でそれぞれ与えられる。バックグラウンド線量として採用するためには $n > 10$ とすることが望ましい。

$n$ が十分大きければ、測定地点 $P$ の3か月積算線量 $X_p$ は $(\bar{X}_{PB}, \sigma_p^2)$ の正規分布に従う。(付録3)。したがって、 $X_p$ が有意な増加(あるいは減少)を示したかどうかを判断するには、

$$\bar{X}_{PB} - 3\sigma_p < X_p < \bar{X}_{PB} + 3\sigma_p \quad (7.18)$$

を満足しているかどうか調べればよい。

(7.18)式が成立しない場合、 $X_p$ は $\bar{X}_{PB}$ に対して有意な変化があったと判断される。

なお、 $\bar{X}_{PB}$ が測定地点 $P$ によって大きく変わらない場合及び $n$ を十分大きくとれない場合には以下の方法を採用してもよい。

(1)  $\bar{X}_{PB}$ がほとんど測定地点によらず一定の値をとる場合

測定地点ごとに $(\bar{X}_{PB}, \sigma_p^2)$ を求める必要はなく全測定地点に対して適用できるバックグラウンド線量 $\bar{X}_B$ とその標準偏差 $\sigma_B$ を決定すればよい。

測定地点が $p$ か所、バックグラウンド測定回数が $i$ である場合、全測定地点の全部の3か月積算線量のひとつを $X_m$ とすれば、 $\bar{X}_B$ 、 $\sigma_B$ は、

$$\bar{X}_B = \frac{\sum_{m=1}^{p \cdot i} X_m}{p \cdot i} \quad (7.19)$$

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{p \cdot i} (\bar{X}_B - X_m)^2}{(p \cdot i - 1)}} \quad (7.20)$$

でそれぞれ与えられる。

この場合、ある3か月積算線量 $X_m$ の増減が有意であるかどうかは、

$$\bar{X}_B - 3\sigma_B < X_m < \bar{X}_B + 3\sigma_B \quad (7.21)$$

を満足するかどうかで判断する。

(2) nが十分大きくとれない場合

全測定地点について

( $\bar{X}_{PB} \cdot \sigma_P$ ) を求め、 $\sigma_P$  と  $\bar{X}_{PB}$  について一次の回帰をとり、

$$\sigma_B = a\bar{X}_{PB} + b \quad (7.22)$$

を求める。

個々の測定地点の  $\bar{X}_{PB}$  は、nが小さくても、個々の測定地点ごとに求め、そのときの  $\sigma_B$  は  $\bar{X}_{PB}$  (7.22)式に代入することで求める。すなわち、 $X_P$  は ( $\bar{X}_{PB}, (a\bar{X}_{PB} + b)^2$ ) の正規分布をすとする。

この場合、ある3か月積算線量  $X_P$  の増減が有意かどうかは、

$$\bar{X}_{PB} - 3(a\bar{X}_{PB} + b) < X_P < \bar{X}_{PB} + 3(a\bar{X}_{PB} + b)$$

(7.23)を満足するかどうかで判断する。

なお、 $\bar{X}_B$  と  $\sigma_B$  は p が大きければ直線関係にあたる実測により知られている。

以上の手法で、ある3か月線量がバックグラウンド線量に対して有意な差があると認められたときには、それはTLDの測定系の全体のばらつき(素子のばらつき、校正のばらつき)およびバックグラウンド線量のばらつきでは説明できない増加(あるいは、減少)があったことを意味するので、まず測定系のチェックを行い、それで説明できない場合は、環境要因の変化の有無や連続モニタのデータなどを考慮して、その原因を追求しなければならない。

## 解説1 TLDによる環境 $\gamma$ 線量測定における一般的事項

本マニュアルにおいて使用を考えているTLDは、一般環境中の電離放射線のうち数10 keVから数MeV程度のエネルギー範囲の $\gamma$ 線の計測を目的とするもので、しばしば環境用と呼ばれる比較的高感度のものである。

TLDは、比較的安価であり、その計測操作も比較的簡単であるから、多数の測定地点に設置することができる。そのため、施設周辺の環境の $\gamma$ 線量をまんべんなくモニタリングすることが可能になる。また、TLDは連続モニタのような複雑な機構を持たないため、欠測が少なく、その特徴を利用すると環境 $\gamma$ 線モニタリング上たいへん有利である。以上の理由から、「環境放射線モニタリングに関する指針」（平成元年3月、原子力委員会）では、TLDを積算線量の測定に用いることが定められている。

TLDを用いて得られるものは環境中の $\gamma$ 線の長期（たとえば3か月）にわたる積算線量である。この値は時間的に積算して得られる結果であるから、TLDの計測のみでは、1回の測定期間中に線量率の時間的な変動があったとしても、その時期および大きさははっきりとはわからず、計測値を経時的に比較することによって積算値間の増減を知り得るのみである。また、ある計測値が平均値に対して有意に増減した場合の原因追求は、1地点のTLD計測のみからでは一般に不十分である。TLDによる多地点の計測、連続モニタによる計測、気象要因等の同時観測、さらには環境への放射性物質の放出情報などの全部または一部と併用することにより、原因の追求と推定が可能となってくる。しかし、慣用的な使用条件下のTLD計測によっては、空間 $\gamma$ 線のエネルギースペクトルおよび照射方向分布の情報は得られないのでこれらの事情も前述の原因追求にあたって制約になることは否定できない。

本マニュアルにはTLDによる測定、校正法、計測値の評価などについての標準的手法を示した。また、TLDによる計測値をより正確に評価するためには、計測手順を適切なものにすることのほかに、TLD計測値に対する自己照射の寄与ならびに宇宙線の寄与を明確にすること、および適切な各種の補正が必要であり、これらについても本文および付録に示した。また、複数個の素子による同一測定地点、同一期間の計測において、個々の素子の計測値のなかで他より著しく離れた値が生ずることがある。このようなとき、かけ離れた値を同一条件下の数値群から除くべきか否かの判断の手法が必要であり、この手法も示した。

TLDによる測定結果を不確実にする要因は以上のように少なくないが、このようなことは一般にどの測定法についても多かれ少なかれあるものである。ただし、適切な手順に従えば再現性のあるかなり良好な結果が期待できる。もちろん計測値にはある種の偏りは避けがたい。しかし、それが決まった大きさのものならば、測定期間ごとの線量の推移の把握にはとくに支障はない。

TLD、手順、測定場所等の変更によって、得られる計測値の精度に差の出ることがある。このような差は技術の進歩、ときには自己照射線量の差などによってもたらされるものである。技術はまだ進歩の余地があるし、現在も止まることなく進歩している。一方、一般にどんな計測でも不確かさ（誤差）をなくすることは不可能である。このような意味で、合理的に処理できない計測値では、計測値の差をそのまま記載するしかない。ただし、データとしては、使用したTLD、手順、測定場所等の変更などを付記することが必要である。

一測定地点における測定結果を同一期間のほかの地点の結果と比較することは、異常値の原因追求においては非常に重要である。しかし、環境 $\gamma$ 線のレベルと特性は各地点の環境条件に大きく支配され、また地点ごとにTLDの設置状況も変わりうるので、平常値どうしを比べてその差を問題にすることは、一般にあまり意味がない。

また、TLDの測定結果と同一地点に設置された他の種類の測定器（たとえば、DBM方式の連続モニタ）から得られる測定結果との比較においても、使用機器の諸特性の相違、校正方法の相違、設置状況の相違などのため、差が生じたとしてもそれはやむを得ない。

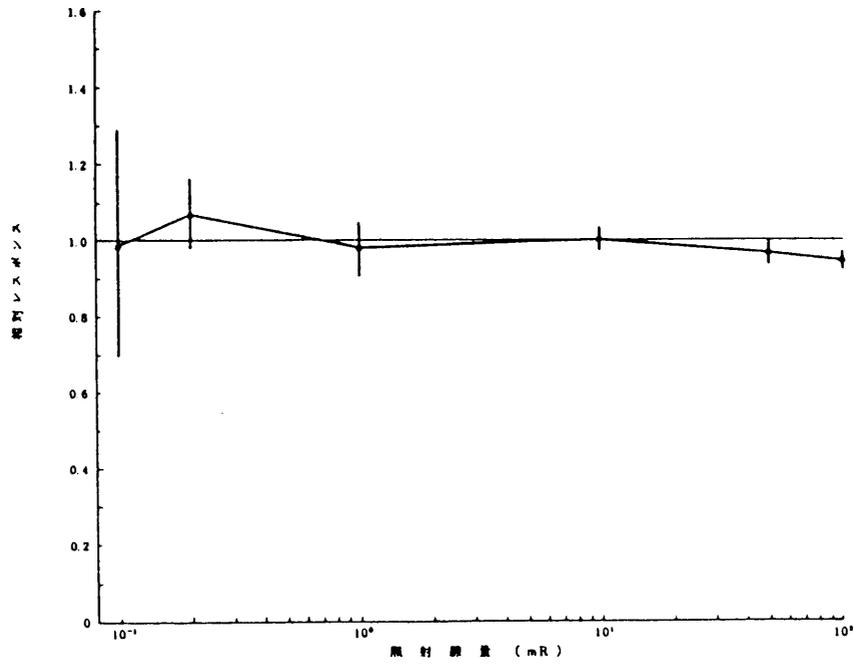
## 解説 2 使用 TLD とその特性

実用されている TLD の特性およびそれを実際にモニタリングに用いた場合の結果の例を以下に図および表で示す。解第 2, 1 図から解第 2, 8 図までは TLD, A および B の直接性, エネルギー特性, 方向特性およびフェーディングの例で, それぞれの条件は次のとおりである。

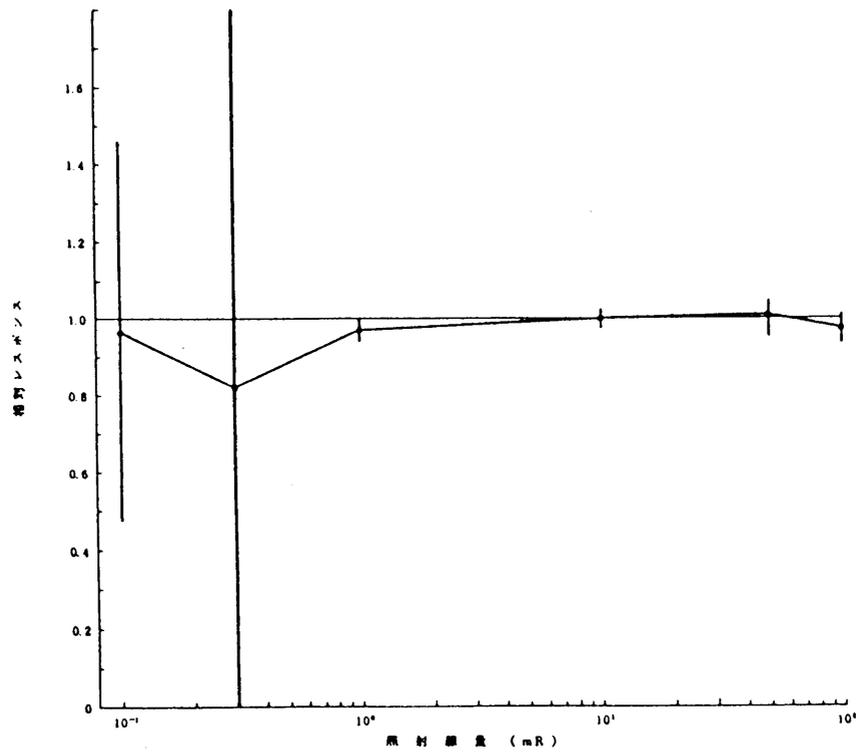
- (1) 直線性  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線で照射。各測定点は TLD 5 本 (10 素子) の平均値である。エラーバーは 1 素子あたりの標準偏差を示し, 照射線量 10 mR に対するレスポンスを 1 として規格化してある。  
(解第 2.1, 2 図)
- (2) エネルギー特性 X 線および  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線で 50mR 程度照射。各測定点は TLD 3 本 (6 素子) の平均値である。 $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線に対するレスポンスを 1 として規格化してある。(解第 2.3, 4 図)
- (3) 方向特性 実効エネルギー 120 keV の X 線および  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線で 50mR 程度照射。各測定点は TLD 2 本 (4 素子) の平均値である。 $0^\circ$  方向 (TLD 中心を通り TLD の中心軸に垂直な方向) のレスポンスを 1 として規格化してある。(解第 2.5, 6 図)
- (4) フェーディング  $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線で 100mR 照射。各測定点は 10 素子の平均値である。エラーバーは 1 素子あたりの標準偏差を示す。照射終了直後または一定時間後の測定値を 1 として規格化してある。  
(解第 2.7, 8 図)

解第 2.1 表は TLD, A および B を各 6 本 (12 素子) ずつ各測定地点に設置したときの, 素子 1 個についての変動係数で示した測定値のばらつきを示す。

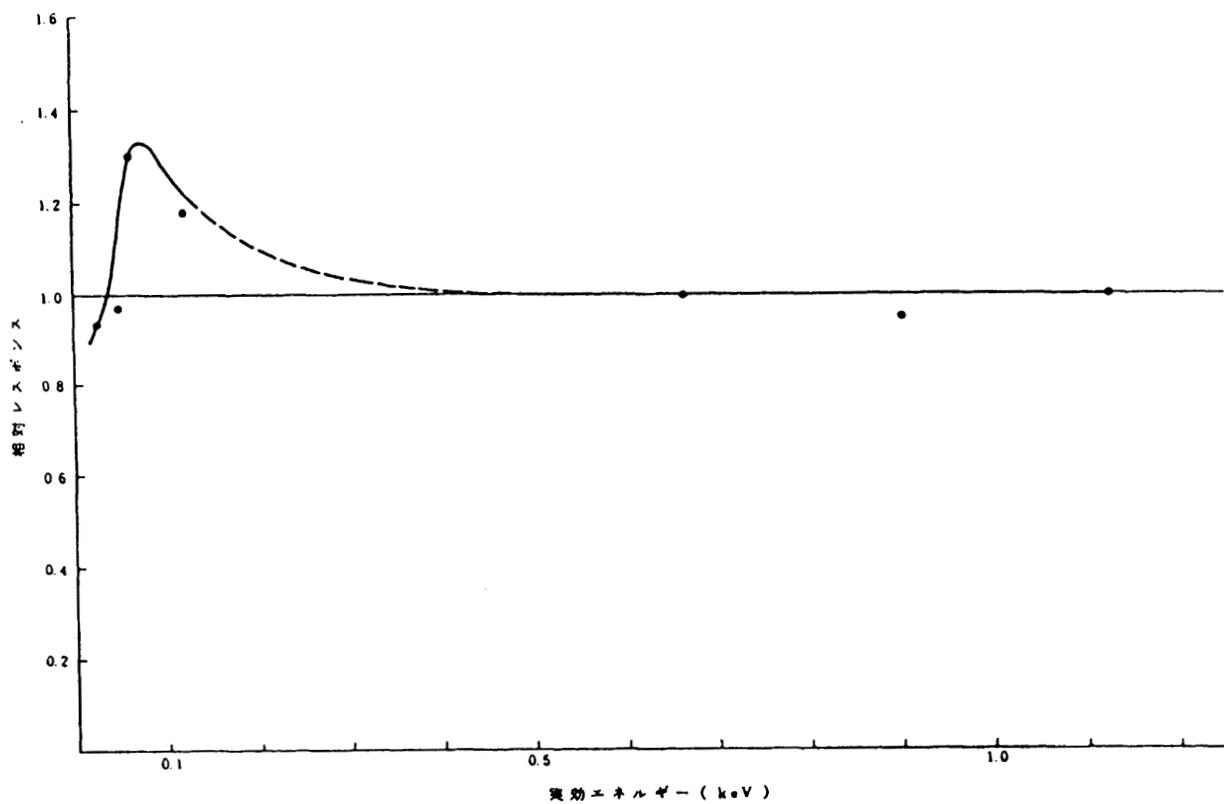
解第 2.2 表は TLD, A および B を各 6 本 (12 素子) ずつ測定地点の収納箱内に地表に対し水平と垂直においた場合の 3 か月の積算線量値 (mR) である。



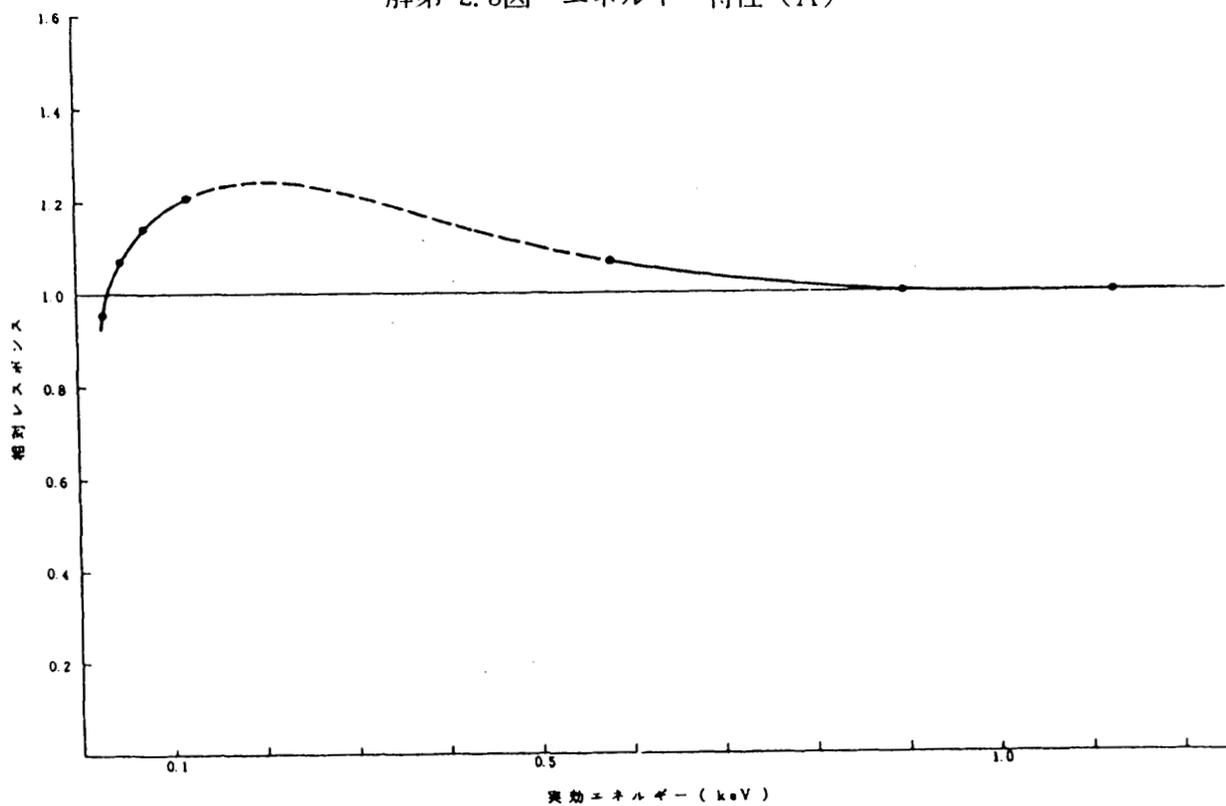
解第 2.1 図 直線性 (A)



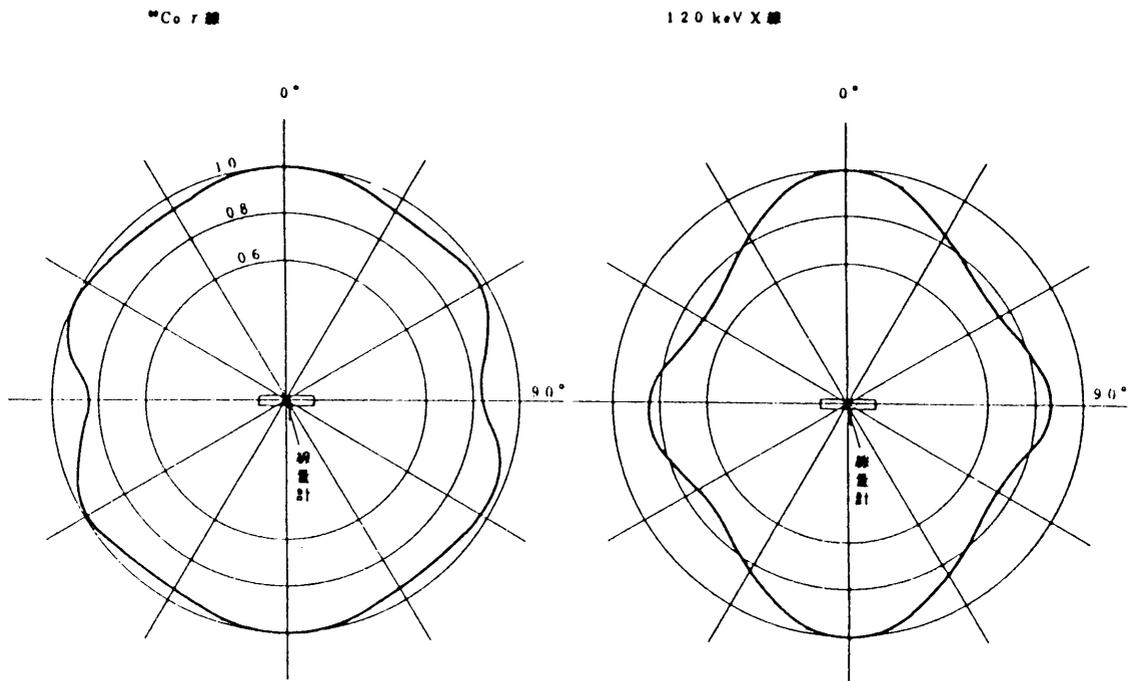
解第 2.2 図 直線性 (B)



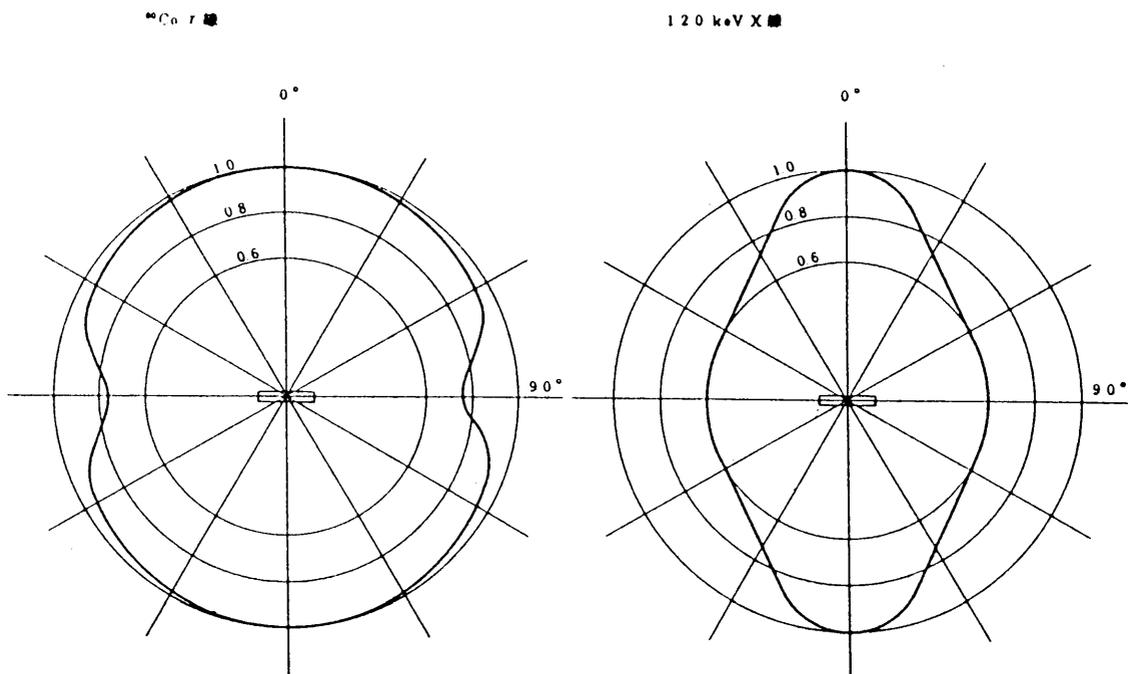
解第 2.3図 エネルギー特性 (A)



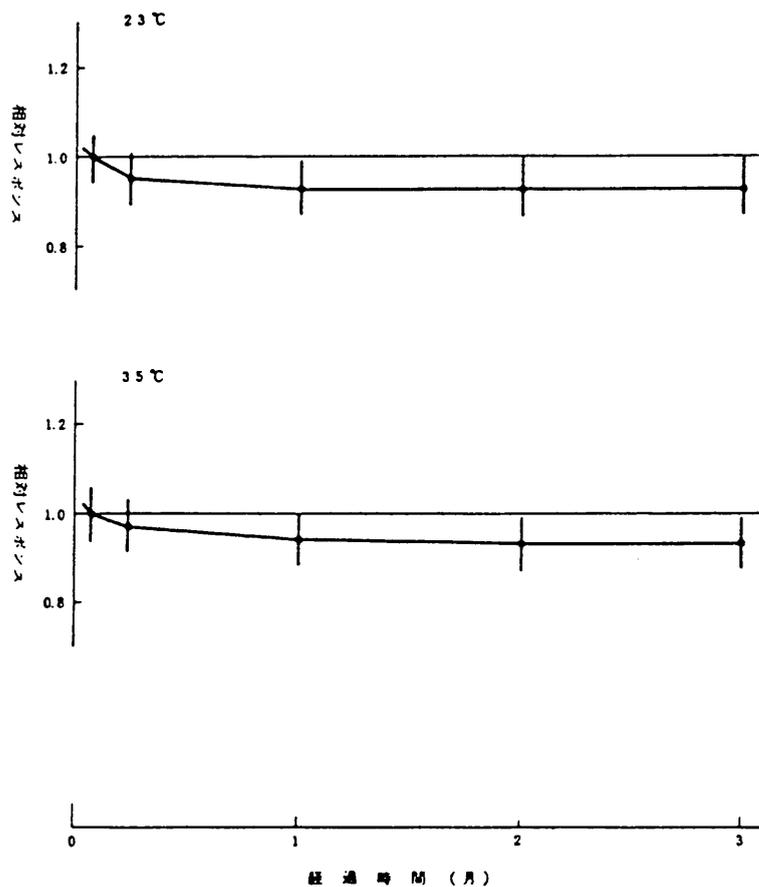
解第 2.4図 エネルギー特性 (B)



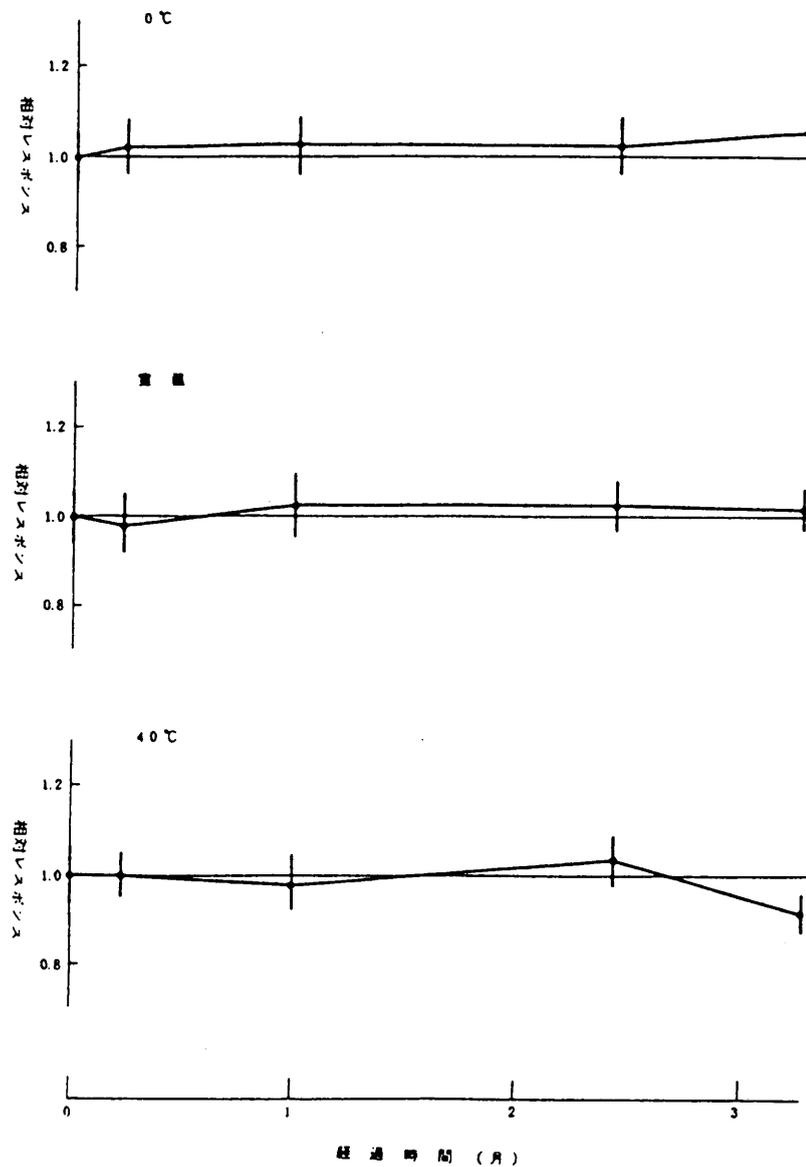
解第 2.5 図 方 向 特 性 (A)



解第 2.6 図 方 向 特 性 (B)



解第 2.7図 フェーディング (A)



解第 2.8図 フェーディング (B)

解第 2.1表 変動係数のばらつき

期 間	設 置 箇 所	T L D	
		A	B
3  か 月	コントロール	0.013	0.041
	a	0.053	0.040
	b	0.053	0.041
	c	0.045	0.026
	d	0.096	0.049
	e	0.043	0.041
	f	0.042	0.089
	g	0.047	0.029
	h	0.043	0.029
	i	0.030	0.028
	j	0.026	0.033
	k	0.036	0.036
	l	0.043	0.028
	m	0.052	0.018
n	0.062	0.029	
o	0.032	0.029	
2  か 月	コントロール	0.048	0.042
	p	0.051	0.027
	q	0.044	0.032
1  か 月	コントロール	0.094	0.032
	r	0.052	0.027
	s	0.041	0.021
平	均	0.051	0.038

解 2.2表 3か月の積算線量値 (mR)

設置箇所	TLD			
	A		B	
	垂直	水平	垂直	水平
a	27.9	28.2	29.6	28.5
b	29.3	30.7	29.9	29.0
c	33.9	32.2	31.7	31.9
e	36.3	35.6	34.5	35.6
g	31.1	31.2	31.1	30.8
l	30.8	31.5	31.9	31.9
m	31.0	31.8	32.4	32.4
n	29.5	30.0	31.2	31.2
o	30.5	30.7	30.9	30.9

## 付録1 自己照射線量と宇宙線の寄与

鉛容器（厚さ5 cm以上）内にTLDを入れ、測定地点で設置期間と同じ期間放置して線量を読み取れば、TLDの自己照射線量および宇宙線寄与の継続的チェックができる。

初期のTLDは素子の性能、TLD構成材等の吟味が十分でなかったために、自己照射線量が大きく、かつロットごとにその差が大きくなった。このような状況のもとでは、鉛容器内での測定値を自己照射線量寄与と宇宙線（一部は鉛しゃへいにより吸収されるが）による寄与との合計値として野外での測定値から差し引くのが、測定結果に長期にわたる一貫性を持たせるための有効な方法であった。

現在入手できるTLDは改良の結果、自己照射線量が低められ（およそ $1\ \mu\text{R}/\text{h}$ 相当、放射線以外の原因による成分も含まれる）、ロット間の差も少なくなっているが、環境 $\gamma$ 線モニタリングにおける素子のアニーリングから積算線量算出に至る一連の作業の監視の目的にも対照用TLDの設置と測定を行うことが望ましい。なお、鉛容器についてはJISに規定がある。

## 付録2 フェーディングの補正

5.3節に示した補正のうち、より精度の高い測定を行う場合に考慮しなければならないのはフェーディングの補正なので、その方法について述べる。

### (1) 設置時と回収時に照射して行う方法

- (i) まずアニールした複数個のTLDを、A、B、C 3組用意する。
- (ii) A、B 2組はそのままとし、他の組Cには一定線量Xを照射して、全体を一つの測定地点に設置する。
- (iii) 一定期間経過した後A、B、Cを回収し、Bには一定線量Xを照射する。
- (iv) A、B、Cの読取値の平均値を $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$ とすると、リーダの校正定数K、フェーディングの補正係数Kfは、それぞれ次のようにして求めることができる。

$$K = \frac{X}{R_B - R_A} \quad (\text{付 2.1})$$

$$\eta = \frac{R_C - R_A}{R_B - R_A} \quad (\text{付 2.2})$$

$$Kf = \frac{2}{1 + \eta} \quad (\text{付 2.3})$$

(ただし、 $(1 - \eta) < 0.2$ のとき)

したがって、リーダ校正およびフェーディング補正をした線量Dtは、次式から求められる、

$$Dt = K \cdot Kf \cdot R_A \quad (\text{付 2.4})$$

### (2) 設置時のみ照射して行う方法

- (i) まず、アニールした複数個のTLDをA、B 2組用意する。
- (ii) Aはそのままとし、Bには一定線量Xを照射して、全体を一つの測定地点に設置する。
- (iii) 一定期間経過した後A、Bを回収する。
- (iv) 別に標準照射したTLDを用い、リーダを校正する。以下の読取値は、すべて校正済のものとする。

- (v) モニタリング期間中の線量率は一定であったと仮定し、そのときの線量率を  $\dot{R}$  とする。フェーディングを指数関数モデルで表わし、フェーディング係数を  $\lambda$  とすると、期間  $t$  における積算線量  $D$  は次式で表わされる。

$$D = \frac{\dot{R}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{付 2.5})$$

したがって  $A$ ,  $B$  の読取値の平均  $\bar{R}_A$ ,  $\bar{R}_B$  とすれば

$$\bar{R}_A = \frac{\dot{R}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{付 2.6})$$

$$\bar{R}_B = \frac{\dot{R}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + X \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{付 2.7})$$

(付 2.6) 式, (付 2.7) 式から

$$\bar{R}_B - \bar{R}_A = X \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{付 2.8})$$

よって

$$e^{-\lambda t} = \frac{\bar{R}_B - \bar{R}_A}{X} \quad (\text{付 2.9})$$

$$\lambda t = \ln \frac{X}{\bar{R}_B - \bar{R}_A} \quad (\text{付 2.10})$$

フェーディング補正係数を  $K_f$  とすると

$$K_f = \frac{\dot{R}}{\frac{\dot{R}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})} = \frac{\lambda t}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (\text{付 2.11})$$

- (vi) 一方, (1)で行った  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  の定義, および(2)で行った  $\bar{R}_A$ ,  $\bar{R}_B$  の定義から

$$K (R_C - R_A) = \bar{R}_B - \bar{R}_A \quad (\text{付 2.12})$$

$$K (R_B - R_A) = X \quad (\text{付 2.13})$$

(付 2.2) 式, (付 2.9) 式, (付 2.12) 式および (付 2.13) 式から

$$\eta = e^{-\lambda t} \quad (\text{付 2.14})$$

よって

$$\ln \frac{1}{\eta} = \lambda t \quad (\text{付 2.15})$$

(付 2.11)式、(付 2.14)式および(付 2.15)式から

$$K' f = \frac{1 n^{\lambda/\eta}}{1 - \eta} \quad (\text{付 2.16})$$

したがって、リーダ校正およびフェーディング補正をした線量 $D_t$ は次で求められる

$$D_t = K' f \cdot R'_{\lambda} \quad (\text{付 2.17})$$

$K f$ と $K' f$ は $(1 - \eta) < 0.2$ で、99.6%以上の一致をみる。

### 付録3 正規分布適合度の検定

過去5年間の実測値（mR/92日）が次のようであったとする。

38, 37, 37, 36, 35, 38, 37, 36, 37, 38, 39, 39, 34, 37, 37, 39, 37, 37, 38, 38  
 ( $\bar{X}=37.2$ ,  $S=1.28$ ,  $N=20$ )

これらの値が正規分布をしているか否かは、 $\chi^2$  分布検定を利用した「観察度数の正規分布への適合度の検定」を行えば、判定できる。

(1) 仮設：この観察度数は正規分布に適合するとする。

階級値	観察度数 N	期待度数 F	$(N - F)^2 / F$
34	1	0.27	1.974
35	1	1.42	0.124
36	2	4.02	1.015
37	8	6.16	0.549
38	5	5.13	0.003
39	3	2.32	0.199
	20	19.32	$3.864 = \chi_{0.2}^2$

ここで、

$$F = N \int_{x-h/2}^{x+h/2} \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2S^2}} dx \quad (\text{付 3.1})$$

(h は階級幅)

(2) 自由度 =  $k - d = 6 - 3$   $\left\{ \begin{array}{l} k : \text{階級数} \\ d : F \text{ を計算するのに用いた統計量 } (\bar{x}, S, N) \text{ の数} \end{array} \right.$

(3) 有意水準を  $\alpha = 0.05$  にとれば、 $n = 3$  の  $\chi_{0.05}^2$  付表4から

$$\chi_{\alpha}^2 = 7.815$$

(4)  $\chi_{0.2}^2$  と  $\chi_{\alpha}^2$  を比較すれば  $\chi_{0.2}^2 < \chi_{\alpha}^2$  , それゆえに仮設は採択された。すなわち、この観察度数は正規分布に適合する。

## 付録4 等分散検定

TLDによるモニタリングの場合、同一測定点では、各3か月積算線量は等分散であることが7.3における評価の前提であるので、F分布検定による等分散の検定についても述べる。なお、同一型式で同一ロットのTLDを用いている場合、等分散であるという条件は満たされているので、ここでの検定は行わなくてもよい。

同一測定地点で、ある3か月積算線量の個々の測定値を $n_1, n_2, \dots, n_n$ 、別の3か月積算線量の個々の測定値を $m_1, m_2, \dots, m_m$ とする。

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (n_i - \bar{n})^2}{n-1} \quad (\text{付 4.1})$$

$$S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (m_i - \bar{m})^2}{m-1} \quad (\text{付 4.2})$$

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (\text{付 4.3})$$

でそれぞれ計算する。

$$\text{自由度 } \phi_1 = n - 1 \quad (\text{付 4.4})$$

$$\text{自由度 } \phi_2 = m - 1 \quad (\text{付 4.5})$$

である。

有意水準 $\alpha$ を定め、F表(付第5.(1)~(2)表)から $F_{\phi_1, \phi_2}(\alpha)$ を求める。

$$F_0 < F_{\phi_1, \phi_2}(\alpha) \quad (\text{付 4.6})$$

ならば、両分散は等しい。

付第1表  $t(\phi, \alpha)$  表

(自由度  $\phi$  と両側確率  $\alpha$  とから  $t$  を求める表)

$\alpha$ $\phi$	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001	$\alpha$ $\phi$
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619	1
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598	2
3	0.756	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941	3
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610	4
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859	5
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959	6
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.405	7
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041	8
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781	9
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587	10
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437	11
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318	12
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221	13
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140	14
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073	15
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015	16
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965	17
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922	18
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883	19
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850	20
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819	21
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792	22
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767	23
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745	24
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725	25
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707	26
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690	27
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674	28
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659	29
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646	30
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551	40
60	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460	60
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.373	120
$\infty$	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291	$\infty$

付第2表 最大値又は最小値を検定するときの棄却限界

(Grubbs, Beckの表)

データ数 n	上 側 確 率			
	0.05	0.025	0.01	0.005
3	1.153	1.155	1.155	1.155
4	1.463	1.481	1.492	1.496
5	1.672	1.715	1.749	1.764
6	1.822	1.887	1.944	1.973
7	1.938	2.020	2.097	2.139
8	2.032	2.126	2.221	2.274
9	2.110	2.215	2.323	2.387
10	2.176	2.290	2.410	2.482
11	2.234	2.355	2.485	2.564
12	2.285	2.412	2.550	2.636
13	2.331	2.462	2.607	2.699
14	2.371	2.507	2.659	2.755
15	2.409	2.549	2.705	2.806
16	2.443	2.585	2.747	2.852
17	2.475	2.620	2.785	2.894
18	2.504	2.651	2.821	2.932
19	2.532	2.681	2.854	2.968
20	2.557	2.709	2.884	3.001
21	2.580	2.733	2.912	3.031
22	2.603	2.758	2.939	3.060
23	2.624	2.781	2.963	3.087
24	2.644	2.802	2.987	3.112
25	2.663	2.822	3.009	3.135
26	2.681	2.841	3.029	3.157
27	2.698	2.859	3.049	3.178
28	2.714	5.876	3.068	3.199
29	2.730	2.893	3.085	3.218
30	2.745	2.908	3.103	3.236
31	2.759	2.924	3.119	3.253
32	2.773	2.938	3.135	3.270
33	2.786	2.952	3.150	3.286
34	2.799	2.965	3.164	3.301
35	2.811	2.979	3.178	3.316
36	2.823	2.991	3.191	3.330
37	2.835	3.003	3.204	3.343
38	2.846	3.014	3.216	3.356
39	2.857	3.025	3.228	3.369
40	2.866	3.036	3.240	3.381
41	2.877	3.046	3.251	3.393
42	2.887	3.057	3.261	3.404
43	2.896	3.067	3.271	3.415
44	2.905	3.075	3.282	3.425
45	2.914	3.085	3.292	3.435
46	2.923	3.094	3.302	3.445
47	2.931	3.103	3.310	3.455
48	2.940	3.111	3.319	3.464
49	2.948	3.120	3.329	3.474
50	2.956	3.128	3.336	3.483
60	3.025	3.199	3.411	3.560
70	3.082	3.257	3.471	3.622
80	3.130	3.305	3.521	3.673
90	3.171	3.347	3.563	3.716
100	3.207	3.383	3.600	3.754

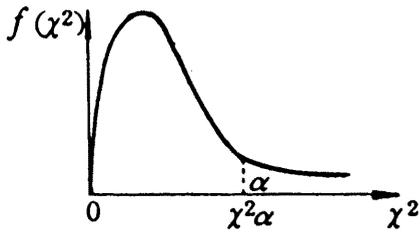
付第3表 ASTM: E 1 7 8 - 6 1 Tの棄却限界表

$\phi e$	データ数, n									
	3	4	5	6	7	8	9	10	12	
(a)	10	2.34	2.63	2.83	2.98	3.10	3.20	3.29	3.36	3.49
	11	2.30	2.58	2.77	2.92	3.03	3.13	3.22	3.29	3.41
	12	2.27	2.54	2.73	2.87	2.98	3.08	3.16	3.23	3.35
	13	2.24	2.51	2.69	2.83	2.94	3.03	3.11	3.18	3.29
	14	2.22	2.48	2.66	2.79	2.90	2.99	3.07	3.14	3.25
	15	2.20	2.45	2.63	2.76	2.87	2.96	3.04	3.11	3.21
	16	2.18	2.43	2.61	2.74	2.84	2.93	3.01	3.08	3.18
	17	2.17	2.42	2.59	2.72	2.82	2.91	2.98	3.05	3.15
	18	2.15	2.40	2.57	2.70	2.80	2.89	2.96	3.02	3.12
	19	2.14	2.39	2.56	2.68	2.78	2.87	2.94	3.00	3.10
	20	2.13	2.37	2.54	2.67	2.77	2.85	2.92	2.98	3.08
	24	2.10	2.34	2.50	2.62	2.72	2.80	2.87	2.93	3.02
	30	2.07	2.30	2.46	2.58	2.67	2.75	2.81	2.87	2.96
	40	2.04	2.27	2.42	2.53	2.62	2.70	2.76	2.82	2.91
	60	2.01	2.23	2.38	2.49	2.58	2.65	2.71	2.76	2.85
	120	1.98	2.20	2.34	2.45	2.53	2.60	2.66	2.71	2.79
	$\infty$	1.95	2.16	2.30	2.41	2.49	2.56	2.61	2.66	2.74
(b)	10	3.12	3.46	3.70	3.87	4.02	4.14	4.24	4.33	4.47
	11	3.04	3.37	3.59	3.76	3.90	4.01	4.11	4.19	4.33
	12	2.98	3.29	3.51	3.67	3.80	3.91	4.00	4.08	4.21
	13	2.93	3.23	3.44	3.60	3.72	3.83	3.92	3.99	4.12
	14	2.88	3.18	3.38	3.54	3.66	3.76	3.85	3.92	4.04
	15	2.84	3.13	3.33	3.48	3.60	3.70	3.78	3.86	3.98
	16	2.81	3.10	3.29	3.44	3.56	3.65	3.73	3.80	3.92
	17	2.78	3.07	3.26	3.40	3.52	3.61	3.68	3.75	3.86
	18	2.76	3.04	3.23	3.37	3.48	3.57	3.64	3.71	3.82
	19	2.74	3.01	3.20	3.34	3.45	3.54	3.61	3.68	3.79
	20	2.72	2.99	3.17	3.31	3.42	3.51	3.58	3.65	3.75
	24	2.66	2.92	3.10	3.23	3.33	3.42	3.49	3.55	3.65
	30	2.60	2.86	3.03	3.15	3.25	3.33	3.40	3.46	3.55
	40	2.55	2.79	2.96	3.08	3.17	3.25	3.31	3.37	3.46
	60	2.50	2.73	2.89	3.01	3.10	3.17	3.23	3.28	3.37
	120	2.45	2.67	2.83	2.94	3.02	3.09	3.15	3.20	3.28
	$\infty$	2.40	2.62	2.76	2.87	2.95	3.02	3.07	3.12	3.20

(a)  $\alpha = 0.05,$

(b)  $\alpha = 0.01$

付第 4 表  $\chi^2$  分布表



$$P = P(\chi^2 \geq \chi^2_\alpha) = \int_{\chi^2_\alpha}^{\infty} f(\chi^2) d\chi^2$$

$$= \int_{\chi^2_\alpha}^{\infty} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} (\chi^2)^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{\chi^2}{2}} d\chi^2$$

n	$\alpha$							
	.99	.98	.95	.90	.80	.70	.50	.30
1	.0 <sup>3</sup> 157	.0 <sup>3</sup> 628	.0 <sup>2</sup> 393	.0158	.0642	.148	.455	1.074
2	.0201	.0404	.103	.211	.446	.713	1.386	2.408
3	.115	.185	.352	.584	1.005	1.424	2.366	3.665
4	.297	.429	.711	1.064	1.649	2.195	3.357	4.878
5	.554	.752	1.145	1.610	2.343	3.000	4.351	6.064
6	.872	1.134	1.635	2.204	3.070	3.528	5.348	7.231
7	1.239	1.564	2.167	2.833	3.822	4.671	6.346	8.383
8	1.646	2.032	2.733	3.490	4.594	5.527	7.344	9.524
9	2.088	2.532	3.325	4.168	5.380	6.393	8.343	10.656
10	2.558	3.059	3.940	4.865	6.179	7.267	9.342	11.781
11	3.053	3.609	4.575	5.578	6.989	8.148	10.341	12.899
12	3.571	4.178	5.226	6.304	7.807	9.034	11.340	14.011
13	4.107	4.765	5.892	7.042	8.634	9.926	12.340	15.119
14	4.660	5.368	6.571	7.790	9.467	10.821	13.339	16.222
15	5.229	5.985	7.261	8.547	10.307	11.721	14.339	17.322
16	5.812	6.614	7.962	9.312	11.152	12.624	15.338	18.418
17	6.408	7.255	8.672	10.085	12.002	13.531	16.338	19.511
18	7.015	7.906	9.390	10.865	12.857	14.440	17.338	20.601
19	7.633	8.567	10.117	11.651	13.716	15.352	18.338	21.689
20	8.260	9.237	10.851	12.443	14.578	16.266	19.337	22.775
21	8.897	9.915	11.591	13.240	15.445	17.182	20.337	23.858
22	9.542	10.600	12.338	14.041	16.314	18.101	21.337	24.939
23	10.196	11.293	13.091	14.848	17.187	19.021	22.337	26.018
24	10.855	11.992	13.848	15.659	18.062	19.943	23.337	27.096
25	11.524	12.697	14.611	16.473	18.940	20.867	24.337	28.172
26	12.198	13.409	15.379	17.292	19.820	21.792	25.336	29.246
27	12.879	14.125	16.151	18.114	20.703	22.719	26.336	30.319
28	13.565	14.847	16.928	18.939	21.588	23.647	27.336	31.391
29	14.256	15.574	17.708	19.768	22.475	24.577	28.336	32.461
30	14.953	16.306	18.493	20.599	23.364	25.508	29.336	33.530

表注：(i) たとえば，表中の .0<sup>3</sup>157 は .000157 を意味する。

(ii)  $n > 30$  のときは  $\sqrt{2\chi^2} \sim \sqrt{2n-1}$  として正規分布表を用いる。

.20	.10	.05	.02	.01	.001
1.642	2.706	3.841	5.412	6.635	10.827
3.219	4.605	5.991	7.824	9.210	13.815
4.642	6.251	7.815	9.837	11.345	16.266
5.989	7.779	9.488	11.668	13.277	18.467
7.289	9.236	11.070	13.388	15.086	20.515
8.558	10.645	12.592	15.033	16.812	22.457
9.803	12.017	14.067	16.622	18.475	24.322
11.030	13.362	15.507	18.168	20.090	26.125
12.242	14.684	16.919	19.679	21.666	27.877
13.442	15.987	18.307	21.161	23.209	29.588
14.631	17.275	19.675	22.618	24.725	31.264
15.812	18.549	21.026	24.054	26.217	32.909
16.985	19.812	22.362	25.472	27.688	34.528
18.151	21.064	23.685	26.873	29.141	36.123
19.311	22.307	24.996	28.259	30.578	37.697
20.465	23.542	26.296	29.633	32.000	39.252
21.615	24.769	27.587	30.995	33.409	40.790
22.760	25.989	28.869	32.346	34.805	42.312
23.900	27.204	30.144	33.687	36.191	43.820
25.038	28.412	31.410	35.020	37.566	45.315
26.171	29.615	32.671	36.343	38.932	46.797
27.301	30.813	33.924	37.659	40.289	48.268
28.429	32.007	35.172	38.968	41.638	49.728
29.553	33.196	36.415	40.270	42.980	51.179
30.675	34.382	37.652	41.566	44.314	52.620
31.795	35.563	38.885	42.856	45.642	54.052
32.912	36.741	40.113	44.140	46.963	55.476
34.027	37.916	41.337	45.419	48.278	56.893
35.139	39.087	42.557	46.693	49.588	58.302
36.250	40.256	43.773	47.962	50.892	59.703

付第5.(1)表 F ( $\phi_1, \phi_2; 0.05$ ) 表

$\phi_1$										
$\phi_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.32	2.16
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83

$\alpha = 0.05$ ,  $\phi_1$  : 分子の自由度  $\phi_2$  : 分母の自由度

									$\phi_1$
12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$	$\phi_2$
244	246	248	249	250	251	252	253	254	1
19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	2
8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	3
5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	4
4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	5
4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	6
3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	7
3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	8
3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	9
2.91	2.84	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	10
2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	11
2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	12
2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	13
2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	14
2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	15
2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	16
2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	17
2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	18
2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	19
2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	20
2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	21
2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	22
2.20	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	23
2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	24
2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	25
2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	26
2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	27
2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	28
2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	29
2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	30
2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	40
1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	60
1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25	120
1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	$\infty$

付第5.(2)表F ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ; 0.01) 表

$\phi_1$										
$\phi_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4052	5000	5403	5625	5764	5859	5928	5982	6022	6056
2	98.5	99.0	99.2	99.2	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4
3	34.1	30.8	29.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2
4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5
5	16.3	13.3	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1
6	13.7	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87
7	12.2	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62
8	11.3	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81
9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26
10	10.0	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47
$\infty$	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32

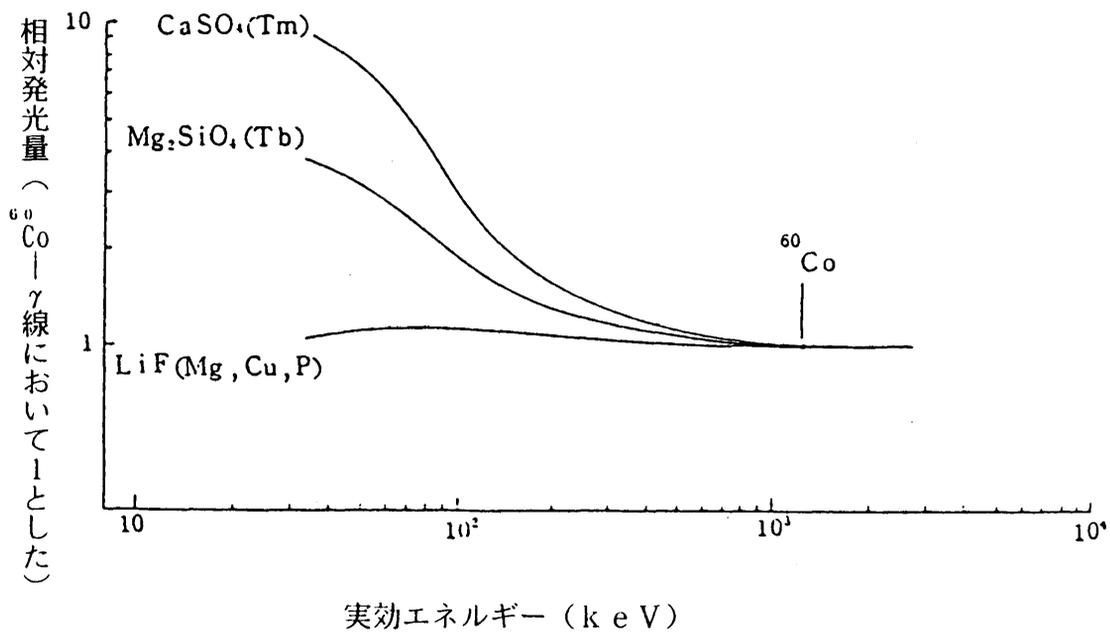
$\alpha = 0.01$ ,  $\phi_1$  : 分子の自由度  $\phi_2$  : 分母の自由度

										$\phi_1$
12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$		
										$\phi_2$
6106	6157	6209	6235	6261	6287	6313	6339	6366	1	
99.4	99.4	99.4	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	2	
27.1	26.9	26.7	26.6	26.5	26.4	26.3	26.2	26.1	3	
14.4	14.2	14.0	13.9	13.8	13.7	13.7	13.6	13.5	4	
9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02	5	
7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88	6	
6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65	7	
5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86	8	
5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31	9	
4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91	10	
4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60	11	
4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36	12	
3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17	13	
3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00	14	
3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87	15	
3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75	16	
3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65	17	
3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57	18	
3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49	19	
3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42	20	
3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36	21	
3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31	22	
3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26	23	
3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21	24	
2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17	25	
2.96	2.82	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13	26	
2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10	27	
2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17	2.06	28	
2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.03	29	
2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01	30	
2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80	40	
2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60	60	
2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38	120	
2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00	$\infty$	

## 付録5 $\gamma$ 線エネルギー情報の把握

### (1) 原理

TLDは本来、集積線量を簡便に測定するための測定器であるが、TLDのエネルギー特性の違いを利用することによって、 $\gamma$ 線エネルギーのおよその情報を知ることができる。すなわち、現用されているTLDについてみても、付第5.1図に一例を示すように、そのエネルギー特性はかなり異なっているので、異種のTLDを対にして使用し、<sup>(注)</sup>発光量の比をとれば、 $\gamma$ 線の実効的なエネルギーがわかる。



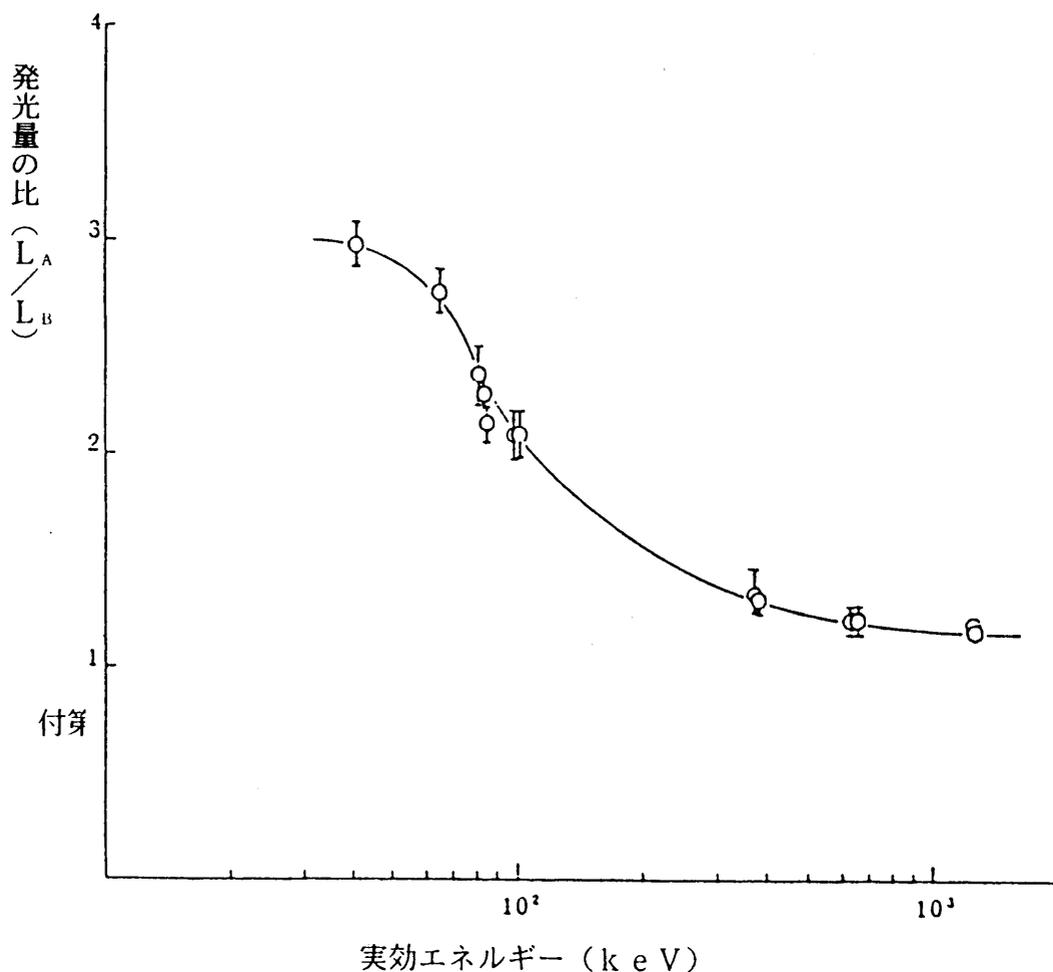
付第5.1図 TLDの発光量のエネルギー依存性

また、TLDにフィルタをかぶせると、そのエネルギー特性はフィルタの材質および厚さにより変化する。そこで、2個の同種のTLDに異なるフィルタをかぶせたものを対にして使用すれば、上と同じ理由で、発光量の比をとることにより、 $\gamma$ 線の実効的なエネルギーがわかる。

注) 連続スペクトルをもったX線及び複数のエネルギーからなる $\gamma$ 線の線質(Radiation quality)は、一般的に第1半価層から決定した実効的エネルギーで表わされている。熱ルミネセンス物質の異なった2種類のTLD、又はホルダー厚を変えたTLDの組合せによって求められたエネルギーは、上記の半価層で求められたエネルギーと一致するとは限らないので混乱を避けるために実効エネルギーとせず実効的エネルギーとした。

## (2) 異種のTLDを用いる方法

異種のTLD (AおよびB) に、X線又は $\gamma$ 線の同一線量を照射したときの、同一リーダを用いて読み取った発光量の比 ( $L_A / L_B$ ) と、光子実効エネルギーとの関係の1例を付第 5.2図に示す。ここで、TLD (AおよびB) はそれぞれガラス毛细管に封入された  $CaSO_4:Tm$  および  $Mg_2SiO_4:Tb$  であって、フィルタを有していない。図に示した誤差棒は、1図の実験に供した素子の数、各3個の発光量のばらつきである。また、各エネルギーにおける照射量はおよそ 500mR である。線源としては、実効エネルギー 101keV 以下の場合にはX線発生装置、377keV 以上は $\gamma$ 線源 ( $^{131}I$ ,  $^{137}Cs$  および  $^{60}Co$ ) が用いられている。



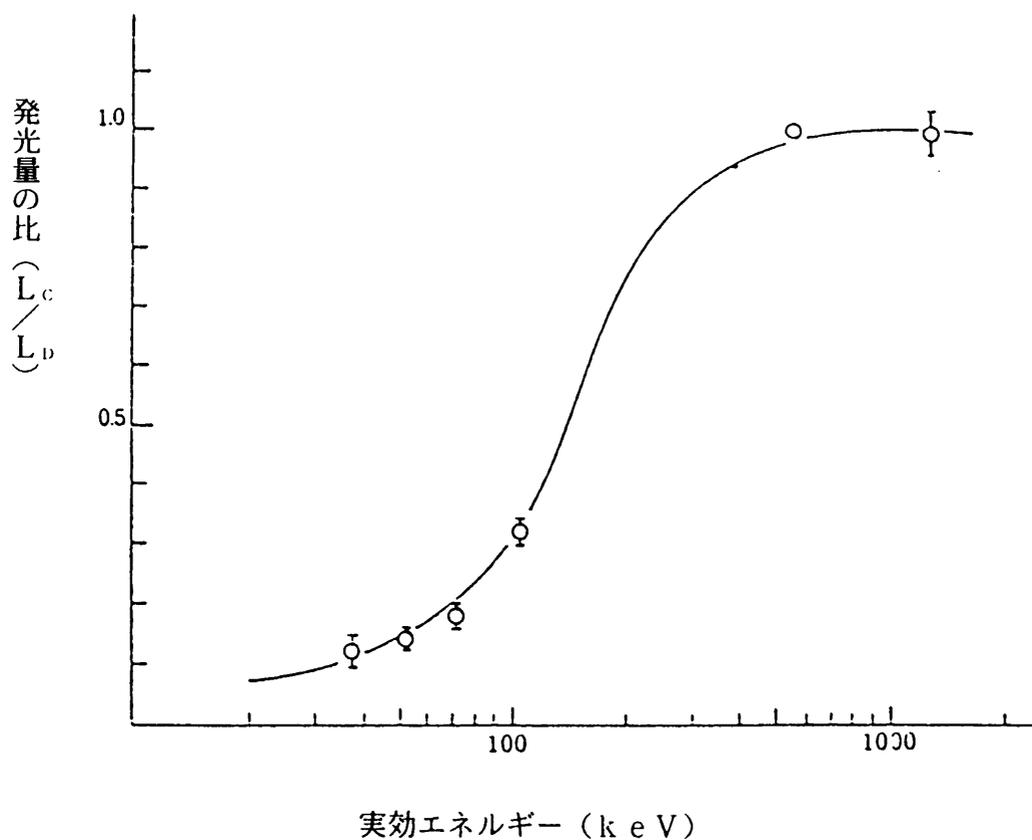
付第 5.2図 同一照射量に対する異種TLD (AおよびB) の発光量の比

実験結果から、この場合60～200 keVのエネルギー範囲で発光量の比は大きく変化する、この比から実効的なエネルギーを求めることが可能である。

エネルギー特性の大きく異なったTLDの対を使用するほど、発光量の比の変化は著しく、またその変化するエネルギー範囲も広くなることが期待されるが、素子の感度および安定性などの点で実用上は自ら制約がある。

### (3) 異なったフィルタを用いる方法

異なったフィルタを備えた2個の同種のTLD（CおよびD）にX線又は $\gamma$ 線の同一線量を照射したときの、発光量の比（ $L_c / L_D$ ）と、光子エネルギーとの関係の1例を付第5.3図に示す。ここでTLD（CおよびD）はともにガラス毛细管に封入された $CaSO_4:Tm$ で、Cはメーカーが供給しているホルダ（エネルギー補償用のSn-Pb合金フィルタ内蔵）の中に収納されたもの、またDは厚さ3.85mmのメタクリル樹脂円筒中に収納されたものである。



付第5.3図 同一照射量に対する異なったフィルタを備えたTLD（CおよびD）の発光量の比

この場合においては、60～400 keVのエネルギー範囲で発光量の比は大きく変化し、実効的なエネルギーを求めることが可能である。フィルタの組合わせを変えることにより、この曲線の形は変化するので、使用目的によりよく合った特性のものを探することができるものと思われる。

#### (4) 本方法の利用

上記の2方法のいずれもまだ現場に適用したことがないので、その利用価値については未知数の部分が多いが、たとえば異常値等が見出されたときの原因追求において一つの資料を提供することが期待される。

## 文部科学省放射能測定法シリーズ

- |                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|
| 1. 全ベータ放射能測定法                        | 昭和 51 年 9 月(2 訂) |
| 2. 放射性ストロンチウム分析法                     | 昭和 58 年12 月(3 訂) |
| 3. 放射性セシウム分析法                        | 昭和 51 年 9 月(1 訂) |
| 4. 放射性ヨウ素分析法                         | 平成 8 年 3 月(2 訂)  |
| 5. 放射性コバルト分析法                        | 平成 2 年 2 月(1 訂)  |
| 6. NaI(Tl) シンチレーションスペクトロメータ機器分析法     | 昭和 49 年 1 月      |
| 7. ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー      | 平成 4 年 8 月(3 訂)  |
| 8. 放射性ジルコニウム分析法                      | 昭和 51 年 9 月      |
| 9. トリチウム分析法                          | 平成 8 年 3 月(1 訂)  |
| 10. 放射性ルテニウム分析法                      | 平成 8 年 3 月(1 訂)  |
| 11. 放射性セリウム分析法                       | 昭和 52 年10 月      |
| 12. プルトニウム分析法                        | 平成 2 年11 月(1 訂)  |
| 13. ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法 | 昭和 57 年 7 月      |
| 14. ウラン分析法                           | 平成 8 年 3 月(1 訂)  |
| 15. 緊急時における放射性ヨウ素測定法                 | 昭和 52 年10 月      |
| 16. 環境試料採取法                          | 昭和 58 年12 月      |
| 17. 連続モニタによる環境 $\gamma$ 線測定法         | 平成 8 年 3 月(1 訂)  |
| 18. 熱ルミネセンス線量計を用いた環境 $\gamma$ 線量測定法  | 平成 2 年 2 月(1 訂)  |
| 19. ラジウム分析法                          | 平成 2 年 2 月       |
| 20. 空間 $\gamma$ 線スペクトル測定法            | 平成 2 年 2 月       |
| 21. アメリシウム分析法                        | 平成 2 年11 月       |
| 22. プルトニウム・アメリシウム逐次分析法               | 平成 2 年11 月       |
| 23. 液体シンチレーションカウンタによる放射性核種分析法        | 平成 8 年 3 月(1 訂)  |
| 24. 緊急時におけるガンマ線スペクトロメトリーのための試料前処理法   | 平成 4 年 8 月       |
| 25. 放射性炭素分析法                         | 平成 5 年 9 月       |
| 26. ヨウ素-129 分析法                      | 平成 8 年 3 月       |

**熱ルミネセンス線量計を用いた環境γ線量測定法**

平成 2年 7月 1日 第1刷 発行  
平成 9年 7月 1日 第3刷 発行

発 行 所

**財 団 法 人 日 本 分 析 セ ン タ ー**

〒263-0002 千葉県千葉市稲毛区山王町 295-3  
電 話 (043) 423-5325 (代表)  
(043) 424-8663 (直通)  
F A X (043) 423-4071