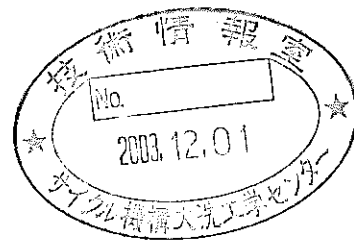


新型線量計に関する性能の調査結果 (次世代線量計の選定) (調査報告)

2003年9月



核燃料サイクル開発機構
大洗工センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

新型線量計に関する性能の調査結果

橋本義大[※]、石川正康[※]、江森修一[※]

要 旨

大洗工学センターの放射線作業環境に適応可能で、かつ個人被ばく管理業務を遂行する上で最も有効な線量計をあらかじめ選定しておき、将来予想される TLD 更新の機会に備えておくことを目的として、最新型の線量計に関する調査を行った。

調査対象の線量計は、TLD、OSL 線量計、蛍光ガラス線量計、電子線量計、固体飛跡検出器とし、各メーカーからの提出資料等を基にして評価を行った。

その結果、最近開発された新型の線量計と比較しても、現行型 TLD の性能は十分有効であることを確認した。また、業務の合理化と、より高度な被ばく管理を目指して線量計の更新を行う場合には、電子線量計が更新線量計の最有力候補であることが分かった。

※ 大洗工学センター 安全管理部 放射線管理課

Result of the investigation on performance of new type dosimeters

Tomoharu Hashimoto*

Masayasu Ishikawa*

Syuuichi Emori*

Abstract

We investigate the new type dosimeter to prepare for renewal of the present TLD in the near future. We hope the new dosimeter to be able to adopt to a radiation working environment in the OEC's radiation control area and be more useful to carry out the personal exposure monitoring.

The objects of investigation are TLD, OSL dosimeter, Glass dosimeter, Electric pocket dosimeter and Solid state track detector. And this report have made using technical data presented by each maker.

As a result of investigation, we recognize that The TLD's performance is so good that we can continue to use for personal exposure monitoring even if it is compared with other recently new type dosimeter.

If we pursue the rationalization and convenience in the operation of dosimeter more and more, then we will recommend the electric pocket dosimeter positively. We recognize obviously that the electric pocket dosimeter can provide us available function and a good artificial operation.

* : Radiation Control Section, Health and Safety Division, O-arai Engineering Center

目 次

第1章 序 文

1.	目的.....	1
2.	調査結果	1

第2章 調査・検討内容

1.	β・γ線量計の性能評価	2
	1) β・γ線量計の特徴	2
	2) β・γ線量計更新後の運用方法	7
	3) β・γ線量計のエネルギーレスポンス比較	9
	4) β・γ線量計を大洗工学センターへ導入する場合の問題点	10
2.	中性子線量計の性能評価	13
	1) 中性子線量計の特徴	13
	2) 中性子線量計更新後の運用方法	15
	3) 中性子線量計のエネルギーレスポンス比較	16
	4) 中性子線量計を大洗工学センターへ導入する場合の問題点	17
3.	導入案及び導入経費の比較	19
4.	導入時に必要となる技術能力	21
5.	各線量計の個人線量管理システムへの適応性	22
6.	総合評価	23
7.	まとめ	25
	謝辞	26
	参考文献	26

付 録

付録-1	各種線量計の性能データ	付録-1(1)
付録-2	電子線量計の性能比較	付録-2(1)

表・図 目 次

表 1-1	レーザー光と LED 光の光刺激の相違点	3
表 1-2	線量評価用 EPD 導入状況	6
表 1-3	$\beta \cdot \gamma$ 線量計の主要性能比較一覧	12
表 2-1	中性子線量計の主要性能比較一覧	18
表 3-1	導入案と導入経費の比較表	19
表 5-1	個人被ばく管理システムの改造内容等	22
図 1-1	現行型 TLD	2
図 1-2	TLD 型 OSL 素子	3
図 1-3	ガラス素子、ガラスカード及びホルダー	4
図 1-4	最新型($\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線用)EPD	5
図 1-5	各線量計の γ 線相対エネルギーレスポンス	9
図 2-1	各線量計及びレムカウンターの中性子線相対エネルギーレスポンス	16
図 3-1	EPD 運用に伴う全体構成図	20

第1章 序 文

1. 目 的

大洗工学センターにおける個人被ばく管理用熱蛍光線量計(以下「TLD」という。)の運用は、昭和58年にフィルムバッジから切り換えて以来続けられ、今年で20年が経過する。そこで、近い将来に予想される TLD 及び TLD 測定システム更新の機会に備えておくことを目的とし、大洗工学センターの放射線作業環境に適応可能かつ個人被ばく管理業務を遂行する上で最も有効な線量計を、以下の条件で調査した。

1) 調査対象とした個人被ばく管理用線量計

(1) $\beta \cdot \gamma$ 線測定用

- ① TLD
- ② 光刺激蛍光線量計 (以下「OSL 線量計」という。)
- ③ ガラス線量計
- ④ 電子式個人線量計 (以下「EPD」という。)

(2) 中性子線測定用

- ① TLD
- ② EPD
- ③ 固体飛跡検出器

2) 調査項目

- (1) 線量計の特徴
- (2) 線量計の運用方法
- (3) 線量計のエネルギーレスポンス
- (4) 大洗工学センターへ導入する場合の問題点
- (5) 導入経費
- (6) 導入時に必要となる技術能力
- (7) 個人線量管理システムへの適応性

3) 調査方法

各線量計メーカーから提出された技術資料及び検査要領書を基に、それぞれの特徴の把握を行い、不明確な点や重要事項については、直接開発担当者から聴き取り調査を行った。さらに、それらの調査結果から、導入に当たって考えられるメリットとデメリットについて抽出を行った。

2. 調査結果

- 1) 最近開発された新型線量計の性能及び運用面のメリットについて、現行の TLD と比較を行った結果、現行の TLD の性能は現状でも十分有効なことを確認した。
- 2) 筆者らは、導入経費が比較的高額であっても、EPD を導入することが業務の合理化を図るためには最も効果的な手段であると考えている。

第2章 調査・検討内容

1. $\beta \cdot \gamma$ 線量計の性能評価

1) $\beta \cdot \gamma$ 線量計の特徴

(1) 現行型 TLD

TLD に組み込まれた ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 素子のエネルギーレスポンスは、60keV 近辺の γ 線 1cm 線量当量と比較して約 25%の過小評価となる。よって低エネルギー γ 線による被ばくが考えられる場合には、測定結果の補正が必要になる。そのために、入射した γ 線のエネルギーを線量計から推定し、簡易的なエネルギー評価を行う機構が備わっている。この機構は、他の線量計には無い大きな特徴である。

測定は熱刺激によって行われ、捕獲電子は一回の刺激により殆ど基底状態に戻ってしまう。このことは、アニールが容易であるというメリットと共に、再測定が不可能というデメリットにもつながる。現行型 TLD を図 1-1 に示す。



図 1-1 現行型 TLD

(2) 新型 TLD

${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ 素子に添加する活性体(Cu)の分布をより均一にすることによって、発光効率が 2~5 倍に改良されている。この素子を、発光吸収フィルタに改良が加えられた新型リーダと共に使用することで、 γ 線の検出限界は 0.03mSv となる。これは、現行型 TLD の γ 線の検出限界 0.1mSv を大きく下回る。

その他の性能及び外観、測定機構は、現行型 TLD と全く同じである。

(3) OSL 線量計

TLD の場合は熱による一回の刺激で捕獲電子の殆どが基底状態に戻ってしまうが、OSL 線量計の場合はレーザー光による刺激では 5%程度、LED 光による刺激では 0.4%程度しか捕獲電子が基底状態に戻らず、多少発光量は減衰するものの、補正を行うことで再測定が可能となる²⁾。アニールは非常に困難で時間がかかり、その傾向は大きな線量になるほど増加する。また、通常の光によって線量情報が失われる可能性もある。レーザー光刺激と LED 光刺激の相違点を表 1-1 に示す。商品名「ルクセルバッジ」として測定サービスが行われており、利用者は年間約 10 万人(メーカー発表の H13 年度実績)である。

表 1-1 レーザー光と LED 光の光刺激の相違点

光源	特徴	仕様用途
レーザー	捕獲電子を一気に放出し大きなカウント数が得られる。精密測定が可能。	研究用測定 高線量の測定
高輝度グリーン LED	捕獲電子の消失が少ないので、再測定の際に補正が要らない。消費電力が少ない。	通常測定

現在、TLD ホルダーに装着可能な OSL 素子及びリーダ(LED 刺激)が開発済みで発売を予定している。価格は 1 個が 750 円程度(ホルダー含まず。)と非常に安価であり、他の線量計と比較して特筆すべき点である。しかしアニールが非常に困難であり、自主運用による再使用は不可能である。よって使い捨てで運用する案がメーカーから提案されている。この案で導入する場合、校正作業はメーカーにおいて出荷時に行われるため、ユーザーは毎回新品を使用することができる。即ち、ユーザー側で行うメンテナンスや校正作業が削減できる。TLD 型 OSL 素子を図 1-2 に示す。

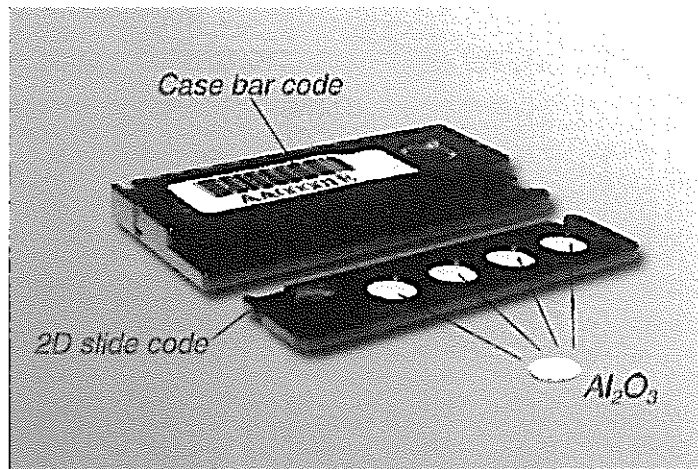


図 1-2 TLD 型 OSL 素子

(4) ガラス線量計

ガラス線量計では捕獲電子が紫外線による刺激で励起されて蛍光を発した後に、基底状態に戻るものが皆無である³⁾。この特徴を利用して、1回の測定結果は複数回(通常は10回、但しそれ以上の回数も可能)の線量読取の結果を基に算出されており、測定精度は他の線量計と比較して最も良好である。一方、アニールするには電気炉において400℃で1時間程度の加熱処理が必要になり、このことが素子と一体化したステンレスガラスカードをひずませる可能性があるため、使用回数が数十回程度に限られる。その他、高湿度環境下では素子表面が白濁することもあり、メーカー側は使用回数の目安をアニール50回程度と判断している。ガラス素子、ガラスカード及びホルダーを図1-3に示す。測定サービスが行われており、利用者は年間約21万人(メーカー発表のH14年度実績)である。

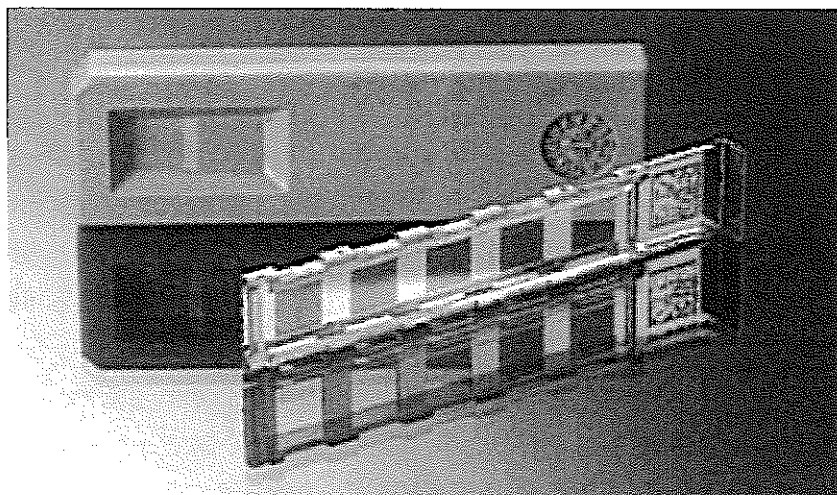


図1-3 ガラス素子、ガラスカード及びホルダー

(5) EPD

測定値を直読することが可能であり、作業中でも被ばく線量の確認ができる。過剰な被ばくを防止するための警報を設定することも可能である。さらに、測定結果を複数の法令区分・施設・作業別に区別して集計することが可能である。これらの機能は、測定器と読取装置が分離している他の線量計には付加できない優れた機能である。

一方、使用する場合には、施設の数だけの入退域管理装置、充電器、測定値を集計する計算機及びソフトウェア、各施設の計算機同士の通信のためのLAN等々、線量計本体以外の周辺機器の整備が必要になり、導入経費が高額になる。また、それらの設備をどのように管理するかが線量計の維持管理よりも重要な問題となる。現在、作業管理用として導入している「常陽」のEPDシステムを例に挙げれば、線量計自体の問題発生は殆ど無いが、サーバのエラーが年に1、2回発生している。(サーバがダウンして入退域ができなくなる事象が発生する。)

電氣的ノイズによる誤作動については、対策が強化されており、一部のメーカーの製品については、故障以外では一切誤作動しないことが確認されている⁴⁾。

現在、作業管理用として、全ての電力会社においてEPDは採用されおり、最近では線量評価用としても導入されつつある。最新型($\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線用)EPDを図1-4に、最近の線量評価用EPD導入状況を表1-2に示す。

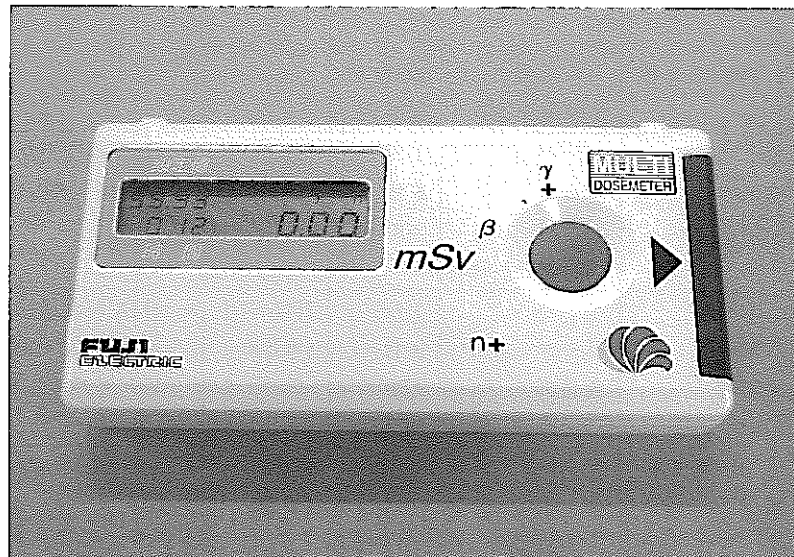


図 1-4 最新型($\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線用)EPD

表 1-2 線量評価用 EPD 導入状況 (H15.3.31 現在)

導入事業所	納品機器	数量	導入日	備考
東電 柏崎・刈羽 1号機～7号機	サーバ リーダー γ用線量計	4台 31台 4220台	H14.4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ γ線のみ EPD で評価。 ➤ β線の評価は現在ガラス線量計を使用。 ➤ H16年度よりβ・γ線用に更新予定。 ➤ 中性子線の測定は対象者が限られるので、固体飛跡検出器を使用しサービス会社に測定依頼。
東電 福島第一 1号機～6号機	サーバ リーダー γ用線量計 β・γ用線量計	不明 25台 4500台 1300台	H14.4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ β・γ線のみ EPD で評価 ➤ 中性子線の測定は対象者が限られるので、固体飛跡検出器を使用しサービス会社に測定依頼。
東電 福島第二 1号機～4号機	サーバ リーダー γ用線量計 β・γ用線量計	2台 25台 3000台 1000台	H14.4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ β・γ線のみ EPD で評価 ➤ 中性子線の測定は対象者が限られるので、固体飛跡検出器を使用しサービス会社に測定依頼。
中部電力 浜岡 1号機～4号機	サーバ リーダー γ用線量計 3線種線量計	不明 32台 3390台 840台	H14.4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ β・γ・n線とも EPD で評価
原電 東海第二	サーバ リーダー γ用線量計 3線種線量計	3台 10台 2000台 500台	H12.7	<ul style="list-style-type: none"> ➤ β・γ・n線とも EPD で評価
原電 敦賀 1号機～2号機	サーバ リーダー γ用線量計 3線種線量計	3台 14台 2000台 500台	H12.7	<ul style="list-style-type: none"> ➤ β・γ・n線とも EPD で評価
日本原燃 六ヶ所 濃縮・埋設	サーバ リーダー 線量計 (測定線種不明)	1台 8台 300台	H15年度 (予定)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ H15年度更新 更新後、EPD での評価開始予定
日本原燃 六ヶ所 再処理	サーバ リーダー 線量計 (測定線種不明)	1台 9台 470台	H15年度 (予定)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ H15年度増設 γ線用 1400台 γ・n線用線量計 1300台
原子燃料工業 東海	サーバ リーダー γ用線量計 3線種線量計	1台 7台 100台 50台	H15.7 (予定)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ β・γ・n線とも EPD で評価する予定

2) $\beta \cdot \gamma$ 線量計更新後の運用方法

それぞれの線量計を大洗工学センターへ導入した後、必要になると考えられる運用手法の変更箇所と、更新後に考えられる効果及び影響について以下に示す。

(1) 新型 TLD 及び現行型 TLD

- ① 現在の運用方法を変更せずに使用可能である。
- ② 更新に伴う業務の合理化は一切図られない。

(2) OSL 線量計

- ① 使い捨てでの運用になるため常に在庫の確認が必要になる。
- ② 検査をして間もない新品の素子が毎回使用できるので、ユーザーによる校正・メンテナンス作業が削減できる。使用済の素子については、リサイクルのために販売元が回収するので廃棄に関する問題は無い。
- ③ 異常計数が発生した場合でも、確認のための再測定が可能のため、評価結果の信頼性を向上させることができる。
- ④ フェーディングは殆ど無いため、有意な線量結果が出た素子を一定期間保管して、後に確認測定を行うことができる。

(3) ガラス線量計

- ① 同一ロット内では素子の感度ばらつきが 1.31%と無いに等しく、素子の校正を全数行う必要が無い。よって、校正作業の軽減が図られる。(ロット毎に数十個程度の感度確認及び校正は必要。)
- ② 再測定が可能な上、測定結果は通常 10 回の読取値を基に算出されるため、評価結果の信頼性を格段に向上させることができる。
- ③ 品質保証上、使用回数を制限する必要がある、素子の入れ替えを頻繁に行う必要がある。

(4) EPD

- ① 複数施設での被ばく線量を区別して評価することができるため、2つ以上の施設で被ばくが予測される場合でも多重指定が可能となる。よって、指定・指定解除申請回数が減り、申請に係る全ての関係者の作業を軽減できる。
- ② 線量計の配布、回収、素子の組み込み、測定、アニール、その他数多くの線量計測チーム所掌の作業が削減できる。
- ③ 作業管理用 EPD の維持管理作業が削減できる。

- ④ 作業者は1つの線量計を着用するだけでよくなり、作業性が向上する。
- ⑤ 線量を直読でき、過度の被ばくを防止するための警報も設定可能である。
- ⑥ 全従事者の入退域時間、被ばく線量のトレンドグラフが入手できるようになり、被ばく原因の特定が容易になる。また、それらの情報は、今後の放射線管理技術の高度化のためにも有効利用することができる。
- ⑦ システム管理に高度な専門的知識を持つ専属の担当者が新たに必要になる。

3) $\beta \cdot \gamma$ 線量計のエネルギーレスポンス比較

各線量計の γ 線相対エネルギーレスポンスを図 1-5 に示す。

γ 線相対エネルギーレスポンスは各メーカーから提出された仕様書を参考に作成し、1cm 線量当量に対する感度の相対比を示している。

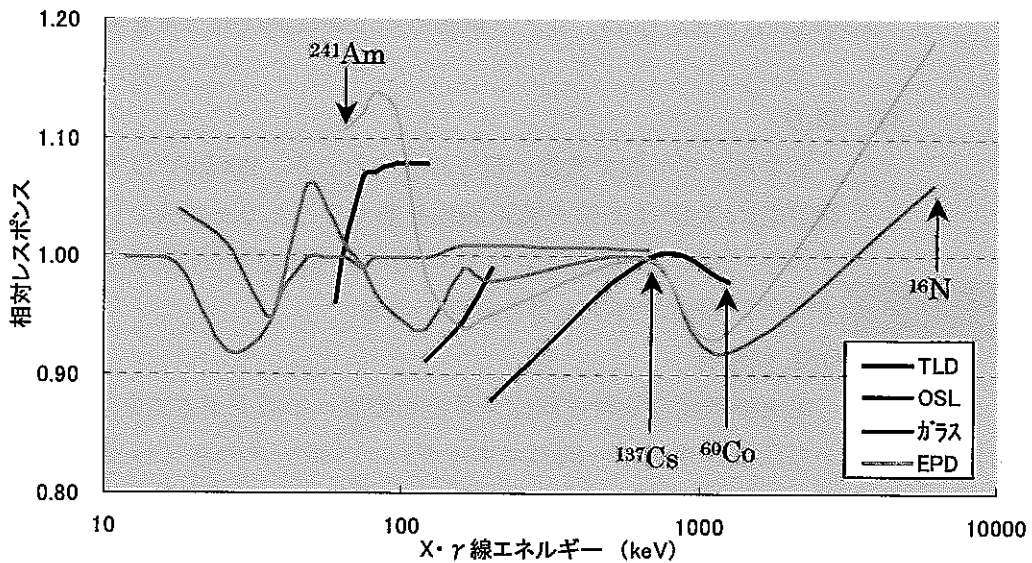


図 1-5 各線量計の γ 線相対エネルギーレスポンス (^{137}Cs γ 線で規格化)

(各メーカーの技術仕様書を参考)

- 注 1) TLD 以外の線量計では、仕様書において検出可能とされるエネルギーが広範囲にわたっているが、レスポンスが $\pm 10\%$ 付近を実際に保証しているのは、そのうちの一部分である。(表 1-3 検出可能エネルギーの欄参照)
- 注 2) EPD は仕様書において $\pm 20\%$ を保証する範囲として 60keV から 6MeV までとしている。
- 注 3) グラフ中の OSL 線量計のデータはルクセルバッジの特性データである。TLD 型 OSL 線量計も同素材を使用しているため、同等の性能を有するとした。
- 注 4) TLD は、エネルギー領域ごとに測定結果を 1.1~1.3 倍に補正することで、被ばく線量を評価するため、グラフが不連続となる。

γ 線の測定に関する各線量計の方向依存性、線量直線性、フェーディング特性については優劣が殆ど無かった。これらについては付録-1 に示す。

β 線の測定に関してのデータは EPD と TLD のみ入手できたが、その他の線量計については基礎データを手に入れた。EPD と TLD の β 線測定に関する基礎データについても付録-1 に示す。

4) $\beta \cdot \gamma$ 線量計を大洗工学センターへ導入する場合の問題点

大洗工学センターでは燃材施設やDCAにおける ^{241}Am の低エネルギー γ 線から、「常陽」における ^{60}Co の γ 線エネルギー領域までの被ばくが考えられるため、この範囲のエネルギーレスポンスが良好であることが必要である。このことを踏まえて、各線量計を大洗工学センターに導入する場合の問題点について検討を行った。なお、 $\beta \cdot \gamma$ 線量計の主要性能比較一覧を表1-3に示す。

(1) TLD

低エネルギー側で感度の低下が見られるが、200keV以下のエネルギーで測定値に1.1~1.3倍の補正係数を乗ずることで $\pm 10\%$ のレスポンスを有している。しかし、補正対象外のエネルギー領域(^{137}Cs 領域から200keV付近まで)に一部感度が不十分な範囲がある。

(2) OSL線量計

医療機関及び放射性同位元素使用施設への販売が主であるため、メーカーからは低エネルギー側のエネルギーレスポンスのみしか公表されていないが、 ^{60}Co の γ 線に対しても良好なエネルギーレスポンスを有することを、一部論文において確認済みである。 γ 線のエネルギーが20keV以下になると多少の感度低下が見られるが、それ以上では全体を通して相対感度はほぼ一定であり、大洗工学センターへの導入に当って問題点はない。

(3) ガラス線量計

最も広範囲で良好なレスポンスを示している。測定サービス・販売対象が原子炉施設から、医療機関、放射性同位元素使用施設まで多岐にわたるため、X線から ^{16}N の γ 線まで測定可能な仕様になっている。さらに、全ての測定範囲において相対レスポンスは $\pm 10\%$ を補償しており、大洗工学センターへの導入に当って問題点はない。

(4) EPD

発電用軽水型原子炉施設での利用が主であるため、 ^{16}N の γ 線を考慮して低エネルギー側よりも高エネルギー側の γ 線測定に主眼を置いた設計となっている。よって、市販モデルのEPDでは、 ^{241}Am の低エネルギー γ 線の領域である60keV以下でエネルギーレスポンスが低下する。(グラフ中ではレスポンスの低下は確認できない。)しかし、EPDは他の線量計と違って、施設毎や作業毎に換算係数の設定が容易である。被ばく線量の過小評価が懸念される場合には、あらかじめ放射線作業環境での特性試験を行い、試験結果を踏まえた適切な換算係数を入域時に設定することで、正しい評価値を得ることは可能である。なお、今回のEPDデータは1機種の様式書のみを参考に作成したが、他機種の様式書に関する仕様については付録-2に示す。

上記検討結果を整理すると、TLD 及び EPD のエネルギーレスポンスが他の線量計と比較してやや劣っていると判断できる。しかし、実運用の際に大きな支障になるほどの問題とも言えない。よって、全ての線量計が大洗工学センターの放射線作業環境に適応可能と判断できる。

表 1-3 $\beta \cdot \gamma$ 線量計の主要性能比較一覧

線量計	TLD	新型 TLD	OSL 線量計	ガラス線量計	EPD
検出限界値 ^{※1}	γ : 0.1mSv β : 1.0mSv	γ : 0.03mSv β : 0.3mSv	確認不可	γ : 0.02mSv	
線量測定下限 ^{※2}			γ : 0.01mSv< β : 0.1mSv<	γ : 0.01mSv< β : 0.1mSv<	γ : 0.01mSv< β : 0.1mSv<
検出可能エネルギー	γ : 25keV~10MeV β : 500keV~4MeV	γ : 5keV~10MeV β : 150keV~10MeV	γ : 5keV~10MeV β : 150keV~10MeV	γ : 10keV~10MeV β : 300keV~3MeV	γ : 50keV~6MeV β : 500keV~2.3MeV
再測定	再測定不可	再測定が可能だが、測定結果は読取のつど減衰するため補正が必要	再測定可能	再測定不可	
利点	<ul style="list-style-type: none"> 測定、アニール時間が短い 簡易に入射γ線のエネルギーが評価可能。 高線量(1000Sv まで)の測定可能 通常使用での寿命は半永久的(約 20 年使用の実績) 	<ul style="list-style-type: none"> 非常に安価(750 円程度/個) 超軽量・小型・化学的に安定 温度の影響を殆どうけない。 フェーディングが小さい。 使い捨て使用のため、維持管理・校正が不要 (工場出荷時に検査される) 	<ul style="list-style-type: none"> 1 測定あたり 10 回の読取を行うため、測定精度が高い。 10keV から 6MeV まで非常に優れたエネルギーレスポンスを持つ。 素子間の感度のばらつきが殆ど無いので、全素子を校正する必要が無い。 フェーディングは殆ど無い。 	<ul style="list-style-type: none"> 複数の法令区分及び施設別に線量を区別して集計し報告できる。 被ばく線量を直読できる。 警報機能がある。 被ばく管理のシステム化に対応し易く、業務の合理化の効果が高い。 作業管理用線量計が不要になり、作業者の負担が軽減される。 	
欠点	<ul style="list-style-type: none"> 導入しても作業量の軽減及び管理手法の改善は行われない。 EPD に次いで高価である。 フェーディングが大きい。 	<ul style="list-style-type: none"> 通常の光で線量情報が消滅してしまう。 自動読取装置はまだ市販化されていない。(1 年以内に発売予定) 	<ul style="list-style-type: none"> 素子の使用回数に制限がある。 表面が白濁する場合がある。 (測定は可能だが、継続使用は不可) アニールするには 400℃で 1 時間の加熱が必要。(アニール炉が必要) 	<ul style="list-style-type: none"> 60keV 以下で感度が悪くなる。 導入に当たって必要となる経費は最も高額となる。 線量計の重量が他と比較して重い。 	

※1 検出限界値とは、3ヶ月間の B.G 線量の分布に対して測定値が信頼度 95%で分離可能な最低線量と定義している。EPD については、1 回の測定時間が短く、B.G 線量の分布を確認することが困難であるため、この定義自体が成立しない。OSL について、本概念により算出された検出限界値に関する資料は入手できなかった。

※2 線量測定下限とは、メーカーが独自に設定する値であり定義は不明確である。測定器が感度を持つことのできる最低線量とも解釈可能だが、実運用の際の線量報告では、信頼性確保のために最低線量を 1 桁上げて使用する場合が多い。

2. 中性子線量計の性能評価

1) 中性子線量計の特徴

(1) TLD

中性子線用 TLD は、 γ 線のみで感度を有する ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子と、 γ 線及び中性子線に感度を有する ${}^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子から構成される。 ${}^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子は、そのままでは速中性子線に対して感度が無いが、アルベド法(人体によって後方散乱した中性子線を検出し、速中性子線に関する情報を推定することで、測定する方法。)を採用し速中性子線の測定も可能にしている。全ての素子が γ 線に対して感度を有するため、中性子線を使用せずに感度校正が可能である。さらに、 ${}^7\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子の測定値と、 ${}^6\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子の測定値の差を求めることで、 γ 線と中性子線が混在する放射線作業環境でも、中性子線量のみを求めることが可能である。

測定及びアニール処理は γ 線用素子同様に行えるため、迅速な測定が可能であり、運用が非常に容易であるという大きなメリットがある。

一方、中性子線のエネルギーが高くなるにつれて人体による中性子線の後方散乱が十分に発生しなくなるため、10keV 付近から次第に感度が悪くなる欠点がある。4MeV 中性子線測定におけるレスポンスは、144keV 中性子線測定時の 1/15 から 1/17 までなる。つまり、高エネルギー中性子線の測定に関しては信頼性が低下する。

(2) 固体飛跡検出器

固体飛跡検出器は、熱中性子線と窒化ボロンによる(n, α)反応と、速中性子線と高密度ポリエチレンによる(n, p)反応の 2 つの相互作用を利用する。それらの反応により生成した荷電粒子が、高速で検出器を通過する際に残す飛跡を薬品処理によって拡大し、顕微鏡で計数した数に応じて被ばく線量を測定する。エネルギーレスポンスは、他の線量計と比較して非常に良好であり、 γ 線に感度が無いことも大きなメリットである。

一方、高線量になると検出器に発生するエッチピットが重複して、計数が困難になる欠点がある。通常の薬品処理条件で測定可能な線量は、速中性子線が 50~60mSv、熱中性子線が 2~6mSv 程度までに限定される。(事故時等、予め高線量被ばくの恐れがある場合には、薬品処理条件の変更により、ある程度被ばく線量を推定することは可能)

固体飛跡検出器は、フィルムバッジ同様に再使用不可能であるため使用後は廃棄処分される。

(3) EPD

検出器には、半導体を使用する。ボロン及び高密度ポリエチレンと中性子線の相互作用を利用して荷電粒子を生成する仕組みは、固体飛跡検出器と同様である。相互作用により発生した荷電粒子は半導体に電離電流を発生させ、得られた電気信号から被ばく線量を測定する。今回調査した EPD には熱中性子線用と速中性子線用の二つの検出器が組み込まれている。現場の放射線状況に応じてそれぞれの計測値が評価線量へ寄与する割合を調節して使用する。

速中性子線用検出器は感度が非常に低く、1 カウントあたりの線量換算係数が非常に高くなるため、統計的な誤差が他の線量計に比較して大きくなる。また、EPD は γ 線に対して感度を有するため、高エネルギー γ 線が存在する放射線作業環境では γ 線による誤計数が発生し易く、換算係数の大きい速中性子線用検出器ではその影響が無視できない。その防止策として、速中性子線用検出器には高エネルギー γ 線をディスクリミネーションする機構が備わっているが、その弊害として 200keV \sim 1.1MeV までの中性子線に対するエネルギーレスポンスが基準の 1/10 以下になっている。

2) 中性子線量計更新後の運用方法

それぞれの線量計を大洗工学センターへ導入した後、必要になると考えられる運用手法の変更箇所と、更新後に考えられる効果及び影響について以下に示す。

(1) TLD

- ① 中性子線用 TLD 素子は、 $\beta \cdot \gamma$ 線用素子同様の維持管理で運用可能である。
- ② 測定・アニールが迅速に行えるので、非常に手軽に運用できる。

(2) 固体飛跡検出器

- ① 固体飛跡検出器は、 γ 線には感度を持たないが α 線に感度があるので、空気中のラドン及びその娘核種による影響を避けるため、使用直前まで密封状態で保管する必要がある。
- ② 大量の固体飛跡検出器を簡便に測定するためには、自動エッチング処理装置及び自動読取装置を導入する必要がある。測定には、①機器のセッティング→②エッチング処理(3 時間)→③エッチピットの読み取り(72 秒/1 個)→④専用パソコンでの線量評価計算と 4 段階のプロセスを経る必要があり、1つの検出器の測定評価には最低 4 時間が必要になる。
- ③ エッチング処理で、検出器の溶解したアルカリ薬品類が廃液として発生する(発生量は処理量に依存する)ので、大洗工学センターに導入する際には専用の廃液処理設備若しくは廃液業者への引渡し措置が必要となる。

(3) EPD

- ① 中性子線用検出器の校正のために中性子線場が必要である。特に速中性子線用検出器の校正には、4.2mSv 以上の線量が必要になることが、メーカーの点検要領書に明記されている。(速中性子線用検出器に 4.2mSv 照射した時の統計誤差は約 4.35%である。) 大洗工学センターの校正室では、線源からの距離が 20cm であっても直接線の線量率は最大約 0.8mSv/h であり、必要な線量を得るために検出器 1 個あたり 5 時間照射する必要がある。許可されている使用時間数が 20 時間/週のため、この方法を毎週続けたとしても年間 200 個しか校正できない。よって、点検要領書に記載された校正方法で運用する場合には、新たな中性子線校正場の整備か、許可数量の変更申請が必要となる。
- ② EPD では、施設毎の放射線作業環境に応じた換算係数を入域手続きの際に設定できるため、1つの換算係数で運用している TLD と比較して、より状況に応じた被ばく線量の評価が可能になる。

3) 中性子線量計のエネルギーレスポンス比較

各線量計のエネルギーレスポンスについて比較を行った。(レムカウンターの値は参考値として追加した。) その結果、固体飛跡検出器は比較的良好なレスポンスを有しているが、TLD と EPD については、中性子線のエネルギーによってかなり感度が低下することが確認された。なお、現状では固体飛跡検出器を含めても、全てのエネルギー領域で 1cm 線量当量に対する感度の相対比が ±50%を保証できる線量計は存在しないため、全ての線量計は施設の中性子線のエネルギーに合わせて測定結果を補正する必要がある。

各線量計及びレムカウンターの中性子線測定相対エネルギーレスポンスを図 2-1 に示す。

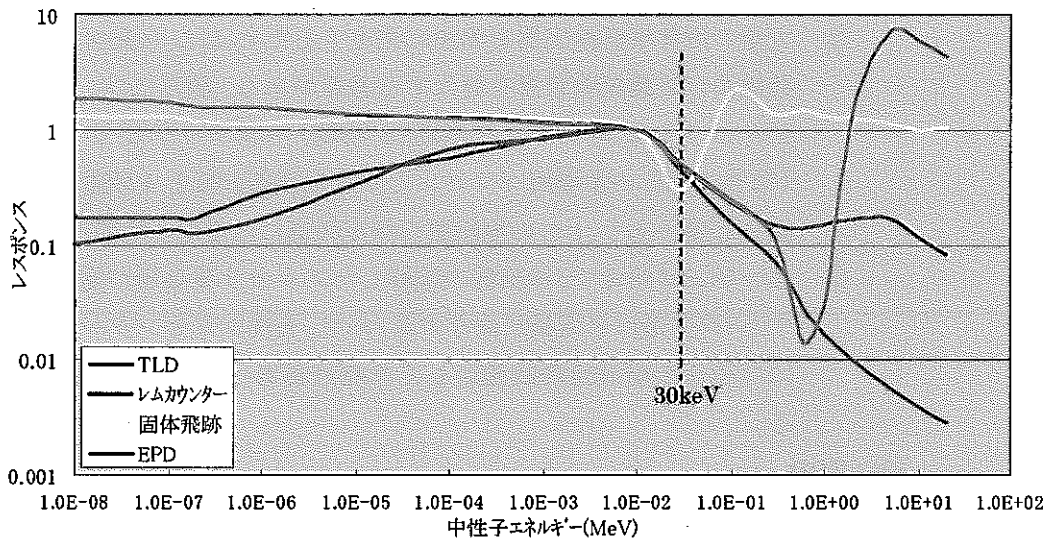


図 2-1 各線量計及びレムカウンターの中性子線相対エネルギーレスポンス

中性子線相対エネルギーレスポンスはメーカーから提出された仕様書及び RADIOISOTOPES vol.5⁶⁾を参考に ²⁵²Cf で規格化された 1cm 線量当量に対する感度の相対比グラフを基に 10keV で規格化したものである。

この図は、「常陽」炉上部の中性子線平均エネルギーである 30keV 近辺⁷⁾及びそれより高エネルギー側における、レスポンスの比較ができるようにしている。

4) 中性子線量計を大洗工学センターへ導入する場合の問題点

大洗工学センターにおいて、中性子線による被ばくが通常考えられるのは、「常陽」の格納容器内及び DCA のプルトニウム燃料貯蔵庫である。「常陽」炉上部における中性子線の平均エネルギーは約 30keV、プルトニウム燃料貯蔵庫では約 500keV³⁾であることを踏まえて、各線量計を大洗工学センターに導入する場合の問題点について検討を行った。

(1) TLD

他の線量計と比較すると若干劣るものの、低エネルギー領域におけるレスポンスは概ね良好である。一方、高エネルギー領域ではエネルギーレスポンスが急激に低下していくが、適切な換算係数を設定することで正しい被ばく線量の評価を行うことは可能である。

(2) 固体飛跡検出器

30keV 付近で感度の低下が見られるが、全体を通して非常に良好なレスポンスを示しており、大洗工学センターの放射線作業環境においても仕様を変更せずに使用可能である。しかし、高線量被ばくの際に評価値の信頼性が担保されない大きな欠点がある。信頼できる測定の上限はメーカーにより多少異なり、速中性子線で 50~60mSv、熱中性子線で 2~6mSv となっている。中性子線による被ばくが殆ど無い大洗工学センターで中性子線量の測定を行うのは、トラブル発生時に正確な中性子線量を把握するための意味合いが強い。よって現状の運用の下では、固体飛跡検出器は不適と判断する。

(3) EPD

600keV 付近で最もレスポンスが悪化する。これは、EPD の仕様が軽水炉で発生する ^{16}N の 6MeV γ 線を考慮し、高エネルギー γ 線に中性子線用検出器が感度を持つことを防止するために起こる弊害である。大洗工学センターの放射線作業環境においては ^{16}N の発生は無いため、仕様の変更を行い、この部分の感度を約 10 倍にすることができる。レスポンスを改良することで、EPD を大洗工学センターの放射線作業環境に適応させることも可能と判断する。また、EPD は施設毎に異なる換算係数を容易に設定できるので、基本的に換算係数を 1 個しか設定できない TLD と比べて、より状況に応じた被ばく線量の評価が容易に可能になる。なお、速中性子線用検出器についてはもともと感度が低く、少ない計数値を基に倍率を高くして線量に換算しているので、他の線量計と比較して統計誤差の影響が大きくなる。

上記検討結果を整理すると、放射線作業環境上は全ての線量計が適応可能と判断できるが、測定上限の問題から固体飛跡検出器は大洗工学センターに不適と判断する。中性子線量計の主要性能比較一覧を表 2-1 に示す。

表 2-1 中性子線量計の主要性能比較一覧

線量計	TLD	固体飛跡検出器	EPD
測定範囲	0.2mSv< (検出限界)	A 社製 速中性子線 : 0.2~50mSv 熱中性子線 : 0.1~6mSv B 社製 速中性子線 : 0.1~60mSv 熱中性子線 : 0.1~2mSv	速中性子線 : 0.3mSv< (誤差 20%) 熱中性子線 : 0.1mSv<
測定可能 エネルギー範囲	0.025eV~4.0MeV	A 社製 熱中性子線 : 0.025eV~0.5eV 速中性子線 : 100keV~10MeV B 社製 0.025eV~15.0MeV	0.025eV~15.0MeV
測定原理	アルベド法	ラジエター密着	ラジエター密着
測定区分	熱中性子線 E<0.4eV 速中性子線 0.4eV<E	熱中性子線 E<0.5eV 速中性子線 100keV<E<10MeV	熱中性子線 速中性子線 (詳細な区分不明)
特徴	①中性子線のエネルギーが 10keV 以上になると、しだいに感度が悪くなるが、中性子線の平均エネルギーがわかれば、ある程度は補正可能である。 ②迅速な測定が可能だが再測定はできない。 ③校正は、中性子線を使わなくてもγ線で代用できる。	①検出器 1 個を測定する時間も 500 個を測定する時間も殆ど変わらないため、定期的に大量の測定を行うには適している。 ②薬品でエッチングする時間(約 3 時間)は短縮不可能である。 ③測定範囲の上限が低いため、高線量被ばく時には、評価値の信頼性が低い。 ④エネルギーレスポンスは特に良好である。 ⑤「常陽」炉上部の平均エネルギー(30KeV 近辺)において、検出感度が若干悪くなる。 ⑥フィルターとホルダー以外は使い捨てである。 ⑦γ線には感度がまったく無いが、空気中の Rn 等の α 線に反応する。(検出器は通常測定面が空気に触れないよう包装されている) ⑧再測定が可能である。 ⑨マンパワーでの測定評価には経験が必要である。	①速中性子線用検出器はもととも検出感度が低いため、測定値の増幅率が大きく、統計的誤差の影響を受けやすい。そのため高エネルギー中性子線による被ばくでは、評価値の誤差が大きくなる。 ②熱中性子線領域のレスポンスは非常に良好である。 ③1MeV 前後でレスポンスの変動が非常に大きい。 ④中性子線用の校正場が必要になる。 ⑤β・γ・n 線用 EPD は非常に高価である。 ⑥唯一、中性子線の測定に関する規格について、JIS に記載がある。

3. 導入案及び導入経費の比較

各線量計を大洗工学センターに導入する際に必要となる経費の比較を行った。また、今後予想される日本原子力研究所大洗研究所(以下、原研大洗という。)との統合も考慮して、両事業所一括導入する場合の経費についても、比較対象とした。なお、経費の比較は、各線量計の導入見積もりの金額に基づいて行った。見積りに使用した主な条件は以下のとおりである。

- 1) 大洗工学センターの管理対象者数は 1,000 人、原研大洗の管理対象者数は 1,200 人とした。
- 2) 見積り金額には、現在使用中の個人線量管理システムの改造費用は含まない。
- 3) 金額は各メーカーから提出された機器の単価を基に計算した。
- 4) EPD に関しては、原研大洗側の管理区域設定状況が不明確なため、原研大洗を含む場合の見積もりから除外する。
- 5) 大洗工学センターのみ導入する場合は、現行型 TLD を全数新型 TLD に更新する場合の見積り金額を基準とした。
- 6) 原研大洗を含む場合は、大洗工学センターと原研大洗の両者が、全数新型 TLD を導入する場合の見積り金額を基準とした。

導入案と導入経費の比較表を表 3-1 に、EPD の運用に伴う全体構成図を図 3-1 に示す。

表 3-1 導入案と導入経費の比較表

導入案	大洗工学センターのみ導入	原研大洗を含む場合
①現行型 TLD バッジを継続使用する場合。	—	◎
②現行型 TLD を全数新型 TLD に更新する場合。	○	○
③OSL 線量計を導入し、中性子線の測定は現行型 TLD を使用する場合。(OSL 線量計を 10 年間使用)	◎	◎
④ガラス線量計を導入し、中性子線の測定を固体飛跡検出器の測定サービスで行う場合。(中性子線の測定サービスは、10 年間利用)	△	○
⑤ガラス線量計を導入し、中性子線の測定を固体飛跡検出器で行い、自主運用する場合。(固体飛跡検出器は、10 年間購入)	△	○
⑥EPD を導入し、全ての施設で $\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線を測定可能な最新型を導入する場合。	×	—
⑦EPD を導入し、 $\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線を測定可能な最新型を「常陽」、DCA、FMF のみに導入し、その他の施設は、現在「常陽」で使用中の APD を流用する場合。	▲	—

- 凡例
- ◎ : 導入経費は基準の約半分
 - : 基準金額
 - △ : 導入経費は基準の約 1.5 倍
 - ▲ : 導入経費は基準の 2 倍から 3 倍
 - × : 導入経費は基準の 4 倍以上

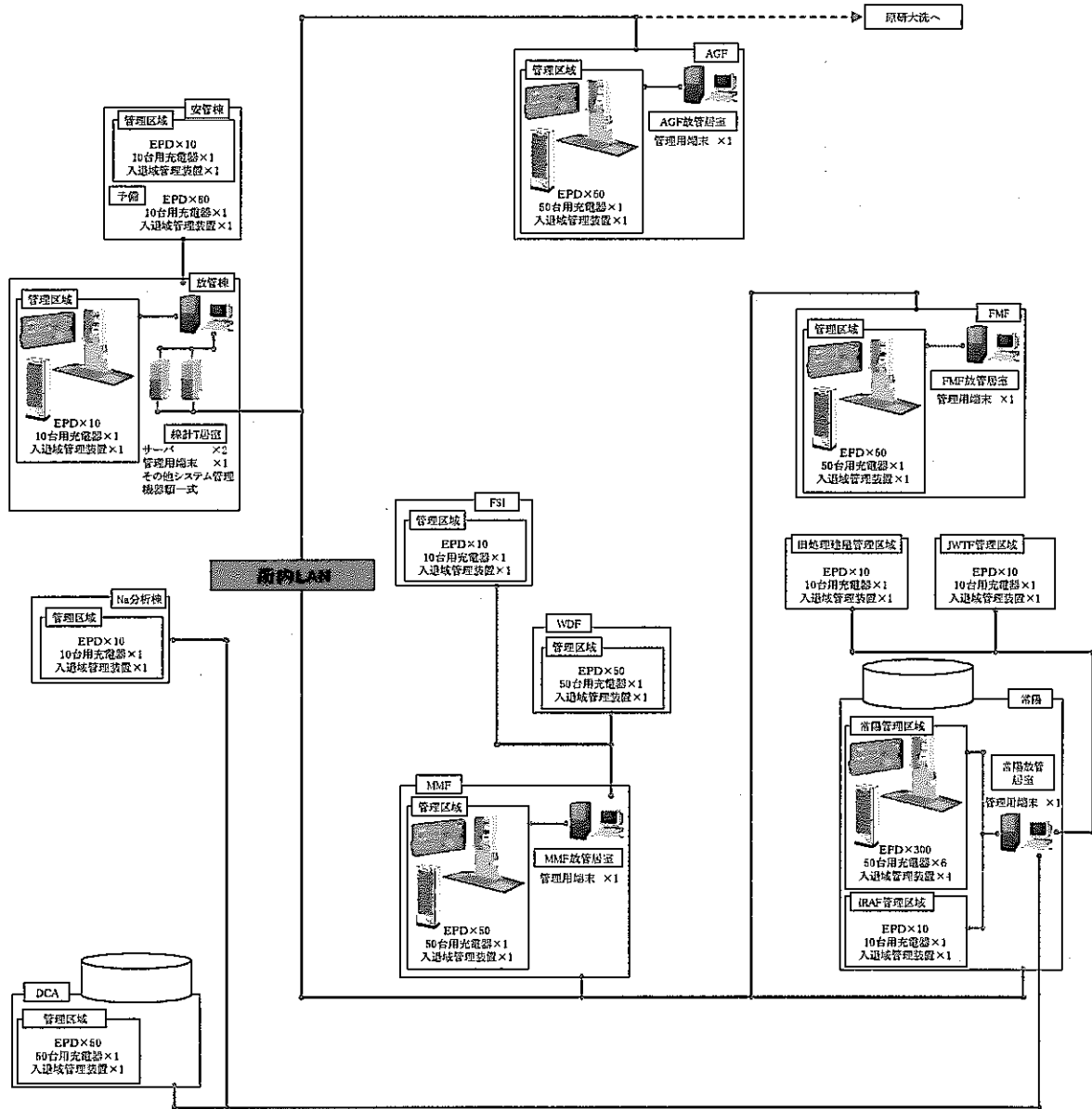


図 3-1 EPD 運用に伴う全体構成図

4. 導入時に必要となる技術能力

1) 新型 TLD

現行型 TLD との相違点は、検出限界の改善のみであるため、特段作業上変更を要する点はない。よって、導入するに当って技術的問題点はない。

2) TLD 型 OSL 線量計

素子形状は TLD と似ているが、発光形態が異なるため、リーダに設置されている LED や光学フィルターの点検手法に多少の知識が必要になることが予想される。詳細については、未公開であるため確認できない。素子は使い捨てのため、工場で生産された最新版の OSL 線量計がメーカーから工場検査を終えて納品される。そのため、メンテナンスや校正に関する技術の習得は不要である。

3) ガラス線量計

測定原理からその外観まで TLD とは全く異なる線量計であるため、新しい管理手法の導入が必要になる。主な相違点は、 γ 線測定用エレメントが 3 つある点、エネルギー評価を行わずに線量の評価が可能な機構になっている点である。

測定とアニールを別に行う必要があり、作業手順の見直しが必要になる。

4) EPD

$\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線用 EPD においても、現在使用中の γ 線用 EPD の維持管理手法と大差無いことを確認した。しかし、速中性子線用検出器が γ 線や電磁波で誤作動を起こさないようにするため、電磁波防止用のパッキンを厳密に取り付けする必要があり、本体を解体(電池交換時)するときには、ねじのトルク管理等の精密な作業が必要になる。

5) 固体飛跡検出器

自動測定システムが正常な状態においては、簡単な操作で誰でも測定可能である。しかし、システムの故障が発生した場合も考慮し、手動測定のための測定器材を準備しておくことが必要になる。その際、マンパワーだけでエッチピットを読み取る必要があるが、その作業には経験が要求され、さらに TLD と比較して多くの労力と時間が必要となる。なお、マンパワーによる測定では、測定者が異なると計数効率が変わり評価線量の誤差が大きくなる可能性がある。また、固体飛跡検出器は、空気中のラドン等からの α 線の影響を受けるので、検出器入荷後の維持管理に注意する必要がある。校正は、メーカー出荷時に行われるので不用である。

5. 各線量計の個人被ばく管理システムへの適応性

現在運用する個人線量管理システムの機能のうち、線量計を更新することで変更や改造が必要となる主な部分は、線量計の読み取り値を被ばく線量として評価する部分(評価関係)、測定結果等の出力帳票に関する部分(出力関係)及び個々の線量計が適当な頻度で使用されるようにローテーションさせながら、管理・運用する部分(運用関係)である。

各線量計を導入した場合に予測される、個人被ばく管理システムの改造内容等について表 5-1 に示す。

表 5-1 個人被ばく管理システムの改造内容等

項目 更新 線量計	評価関係	出力関係	運用関係	備考
新型 TLD	パラメータを変更することで、対応可能である。	検出限界線量の桁数の変更が必要である。	変更は不要である。	改造が必要な部分は、非常に少ない。
OSL 線量計	"	"	使い捨て運用に適したシステムに改造する必要がある。換算係数を素子入荷後に割り付けるシステムが必要になる。	主に運用関係の改造が必要である。
ガラス 線量計	評価式の変更が必要であり、パラメータを変更するだけでは対応不可能である。	検出限界線量の桁数の変更が必要である。また、エレメントの数が TLD より 1つ多いので、データを記録する欄を増やす必要がある。	基本的な管理・運用スタイルが TLD と同様であり、改造が必要な部分は少ない。	線量評価に関する部分では、システムの再構築が必要である。
固体飛跡 検出器	"	エレメントの数が TLD より 2つ少ないので、データを記録する欄を減らす必要がある。	使い捨て運用に適したシステムに改造する必要がある。換算係数を検出器入荷後に割り付けるシステムが必要になる。	"
EPD	線量評価は個々の線量計が行うため、EPD を導入する場合は、これらの機能が不要である。	毎日の測定結果は、四半期毎に集計する必要がある。現行のシステムでは、一回の従事者指定当り 1 つの測定結果しか記録できないため、対応不可能である。	測定結果のみが電子情報としてサーバに送られるため、EPD を導入する場合は、これらの機能は不要である。	殆ど全ての機能が使用不可能であり、現行のシステムを流用して改造する方法を考えるより、新たなシステムを構築した方が合理的である。

6. 総合評価

検討してきた項目を踏まえて、それぞれの線量計の総合的な評価を行った。

1) 新型 TLD

特性及び評価方法は現状の TLD と全く同じであり、検出限界だけが 0.1mSv から 0.03mSv に下がり測定精度が向上している。しかし、冒頭で述べたとおり、線量計を更新する際には線量計の性能の向上のみならず、運用方法の合理化、被ばく管理業務の高度化も目的としている。新型 TLD を更新機種として導入した場合には、後者 2 つの目的は一切達成されない。よって、更新する線量計としては不適である。

2) OSL 線量計

OSL 線量計の基本性能は現行型 TLD と比較して良好であり、再測定も可能である。校正作業や線量計の維持管理作業が不要なため、業務の合理化も図られる。しかし、OSL 線量計は中性子線に不感であるため、中性子線測定には中性子線用 TLD が必要になる。TLD と OSL 線量計を併用する場合、個人被ばく管理業務量の大幅な低減は望めなくなり、メリットは半減する。かえって、中性子線用 TLD との混在によって、線量計の運用方法が複雑になる恐れさえある。しかし、更新に必要な経費が最も低額であることが大きな魅力であり、中性子線の測定をごく一部の従事者に限定し、大多数の従事者は $\beta \cdot \gamma$ 線のみを測定するように、個人被ばく管理の手法を変更することが可能であれば、有力な線量計と判断する。

3) ガラス線量計

ガラス線量計の基本性能は全て TLD と比較して良好である上、再測定も可能であり、同一サンプルについて 10 回測定を行うことで測定結果の信頼性も高い。検出限界も約 0.02mSv と他の線量計に比較して若干低い。ロット内における素子の性能の均一性が良好なため、ロット毎に数十個程度の感度確認及び校正のみ行えば十分であり、TLD と比較して校正作業の軽減が図られる。

一方、ガラス線量計は中性子線に不感であり、OSL 線量計のように現行型の中性子線用 TLD との併用も形状の問題により困難なため、中性子線の測定には一般に固体飛跡検出器が必要とされる。中性子線用 TLD との併用も不可能ではないが、バッチケースの開発が必要になる。2 種類の線量計の混在によって運用方法が複雑になる恐れがあるのは、OSL 線量計導入の場合と同様である。

よって、現行型 TLD より性能は良好であり、OSL 線量計と比較しても遜色は無いが、運用面で業務の合理化に寄与する効果は少なく、コスト的にも不利である。

4) EPD

低エネルギー γ 線の測定における感度低下については、TLD同様に測定値に補正係数を乗ずるなど、運用面の工夫で解決可能である。また、信頼性が低いとされてきた中性子線の測定技術についても最近目覚ましい発展を遂げており、他事業所での導入も進んできている。特性上の問題を解決するために仕様の変更を行う余裕もある。管理者、利用者双方にメリットが多く、放射線管理業務全体の高度化も期待できる。導入後には、線量計測チームが所掌するかなりの業務について、合理化が可能である。

一方、現在の大洗工学センターの校正室において中性子線用検出器の校正ができないという大きな問題があり、この解決策を考える必要がある。また、現在「常陽」で使用しているEPDよりもさらに精密な構造に作られているので、保守管理の技術も高度になってくる。

$\beta \cdot \gamma \cdot n$ 線が測定可能な最新型EPDは非常に高額(γ 線用EPDの倍)で、周辺機器の整備も含めれば、導入する場合にはかなりの費用が必要になる。ただ、最新型のEPDを導入する施設を限定し、残りの施設に現在「常陽」で使用しているEPDを流用するなどし、必要経費を削減することは可能である。

よって、上記デメリットを考慮しても、総合的にそれを上回る十分なメリットが得られることは確実であり、EPDを更新機種として最適の線量計と判断する。

7. まとめ

基本的には新型 TLD、OSL 線量計、ガラス線量計とも、導入によって測定精度を多少改良することは可能であるが、抜本的な管理手法の改善を行うことはできず、業務の合理化も一部分に限られる。よって、得られるメリットに対して掛かる労力やコストと比較すると、現在使用している TLD に代えてまで新規に購入するほどの有効性は見当たらない。

しかし、線量計の更新に当って、導入経費を抑えることのみを重要視する場合には、非常に安価な OSL 線量計は魅力的であり、ある程度の業務合理化も期待できる。よって、上記 3 機種の中では有力である。

一方、EPD は性能面で OSL 線量計やガラス線量計と比較して遜色無く、さらに業務の合理化が多くの点で図られ、得られるメリットが非常に大きい。

特に、懸案事項である複数施設に入域する従事者の管理手法に抜本的な改善が可能になるため、線量計測チーム所掌の業務ばかりでなく、大洗工学センター内の従事者指定・解除に関する全ての作業について軽減が図られ、その効果は計り知れない。例えば、今までは複数施設の従事者指定に制限する必要があった場合でも、EPD 導入後には施設毎の被ばく線量を区別できるので指定の制限を大幅に緩和できる。現状では放射線管理課員や、業務の性質上やむをえないと思われる職員に限定して認められている複数施設の従事者指定が、全ての課室の作業者に無条件に認められれば、指定・指定解除の申請回数は大幅に減り、関連する書類の作成、決済、WBC の測定も回数を減らせる。その他にも、従事者の入域時間に関する情報や施設ごとの正確な被ばく線量の把握、トレンド情報などの今まで得られなかったデータも入手できるようになり、そのデータは今後の放射線管理の質の向上のためにも大いに役立つ情報である。

よって筆者は現在、金額面や線量計の校正について前述のように考慮すべき問題があるとしても、EPD が更新機種として最も有効な線量計であるという結論に達した。今後は導入に向けての検討を行うとともに、EPD についての詳細性能を把握する必要がある。

謝辞

本調査の実施にあたり、それぞれの線量計に関する詳細な情報の提供及び記載内容の校正にご協力いただいた、松下電器産業株式会社、長瀬ランダウェア株式会社、株式会社千代田テクノル、富士電機株式会社、アロカ株式会社の担当者各位に対し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松下電器産業株式会社：“TLバッジ技術資料”、1985.11
- 2) 長瀬ランダウェア株式会社：“Luxel技術資料”、2000.05.12 Ver.02.06
- 3) 株式会社千代田テクノル“ガラスバッジによるモニタリングサービス”2001.04.01
- 4) 富士電機株式会社：“個人警報線量計説明資料”、2002.11.15
- 5) 宮部賢次郎、他：“ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$ 蛍光体を利用した TLD バッジによる中性子線量評価に関する検討”、PNC TN841 84-48 (1984)
- 6) 三枝純、他：“さまざまな中性子スペクトルに対する中性子線量計の応答評価”、RADIOISOTOPES,51,26-33 (2002)
- 7) 鳥居建男、他：“中性子スペクトロメータの開発と中性子スペクトル及び線量当量の測定評価”、PNC ZN9410 88-118 (1988)
- 8) 小佐古敏荘、他：“中速領域中性子線量測定評価に関する研究”、PNC ZJ160 84-04 (1984)

付 録

付録-1 各種線量計の性能データ

付録-2 電子線量計の性能比較

付録一 各種線量計の性能データ

付録-1 各種線量計の性能データ

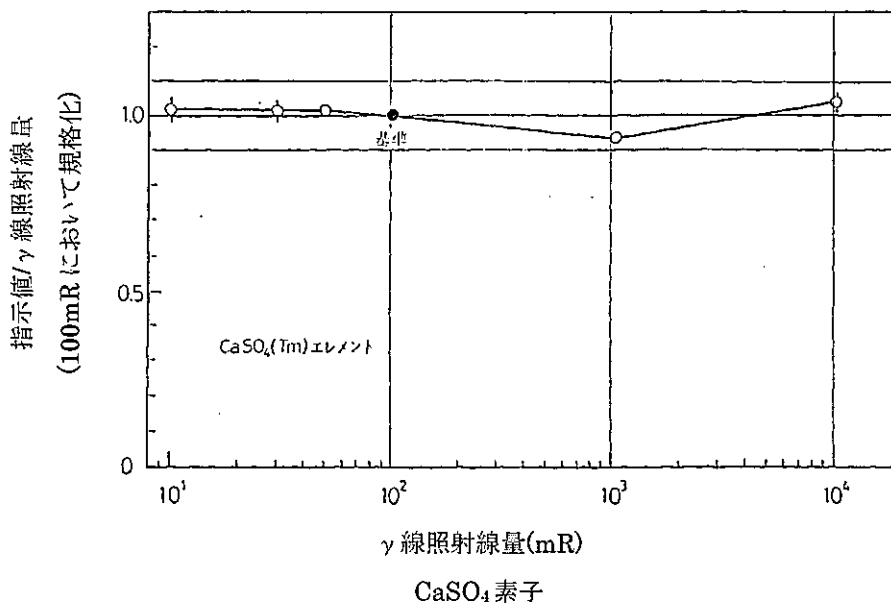
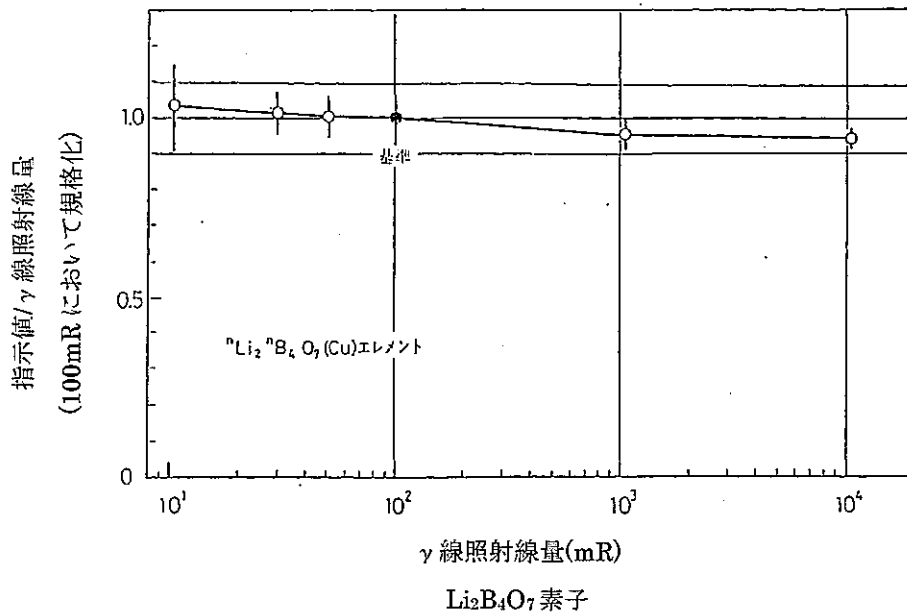
線量計の諸性能について以下に示す。なお最新の JIS の動向については表-I に示す。

1) TLD

(1) γ 線 線量直線性

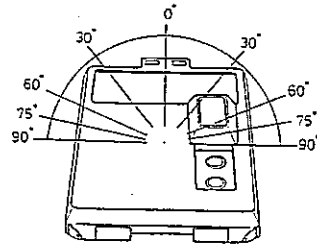
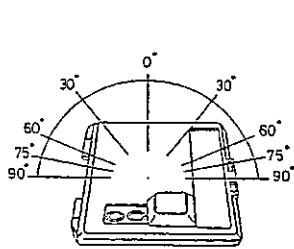
下図は 100mR 照射時の値で規格化されている。

JIS では 1mSv で規格化した時の許容範囲を、0.3mSv、0.1mSv において変化率 10% 以内としている。(評価値の比例性試験)



(2) ^{60}Co γ 線 方向依存性

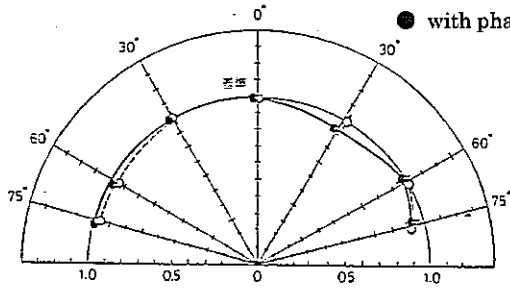
JIS では ^{137}Cs の γ 線を使用して、上下左右 $\pm 60^\circ$ の範囲における許容範囲を $\pm 20\%$ 以内としている。



^{60}Co γ 線

○ in free air

● with phantom

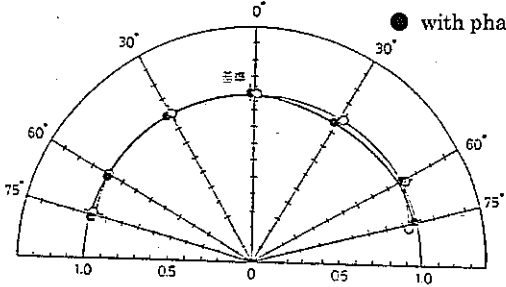


$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子(縦方向)

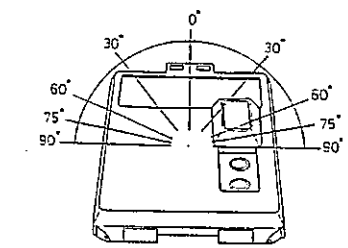
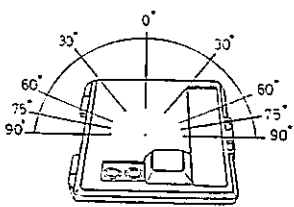
^{60}Co γ 線

○ in free air

● with phantom



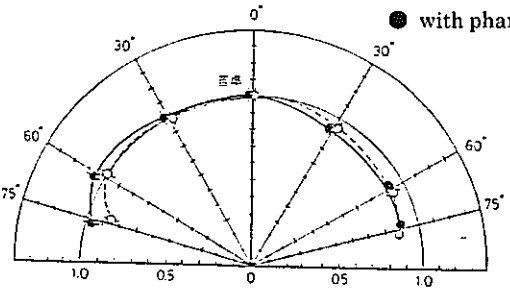
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子(横方向)



^{60}Co γ 線

○ in free air

● with phantom

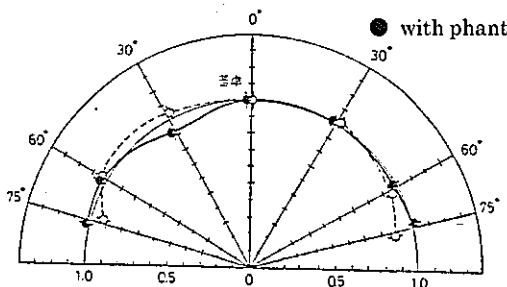


CaSO_4 素子(縦方向)

^{60}Co γ 線

○ in free air

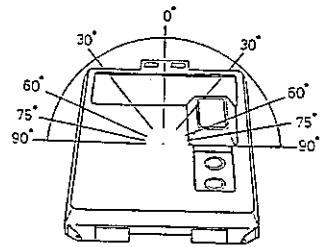
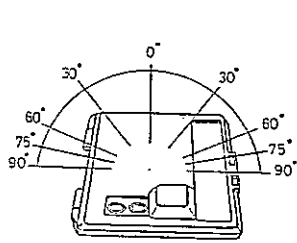
● with phantom



CaSO_4 素子(横方向)

(3) 75keV X線 方向依存性

JISでは80keV付近のX線に対しては、許容範囲を定めていない。



75keV X線

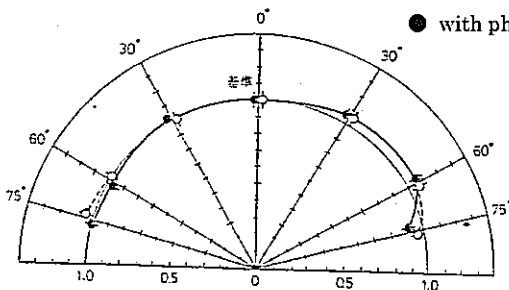
○ in free air

● with phantom

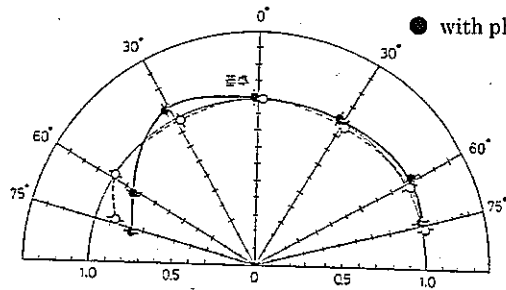
75keV X線

○ in free air

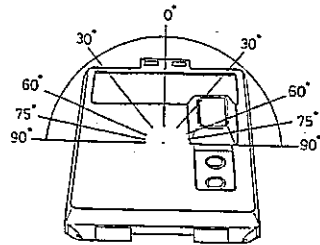
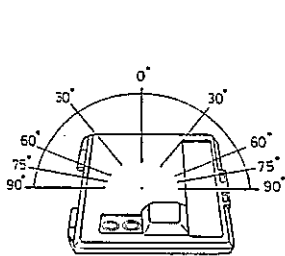
● with phantom



Li₂B₄O₇ 素子(縦方向)



Li₂B₄O₇ 素子(横方向)



75keV X線

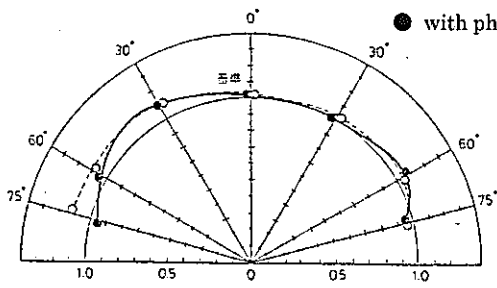
○ in free air

● with phantom

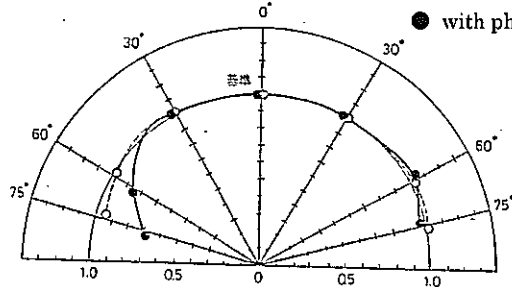
75keV X線

○ in free air

● with phantom



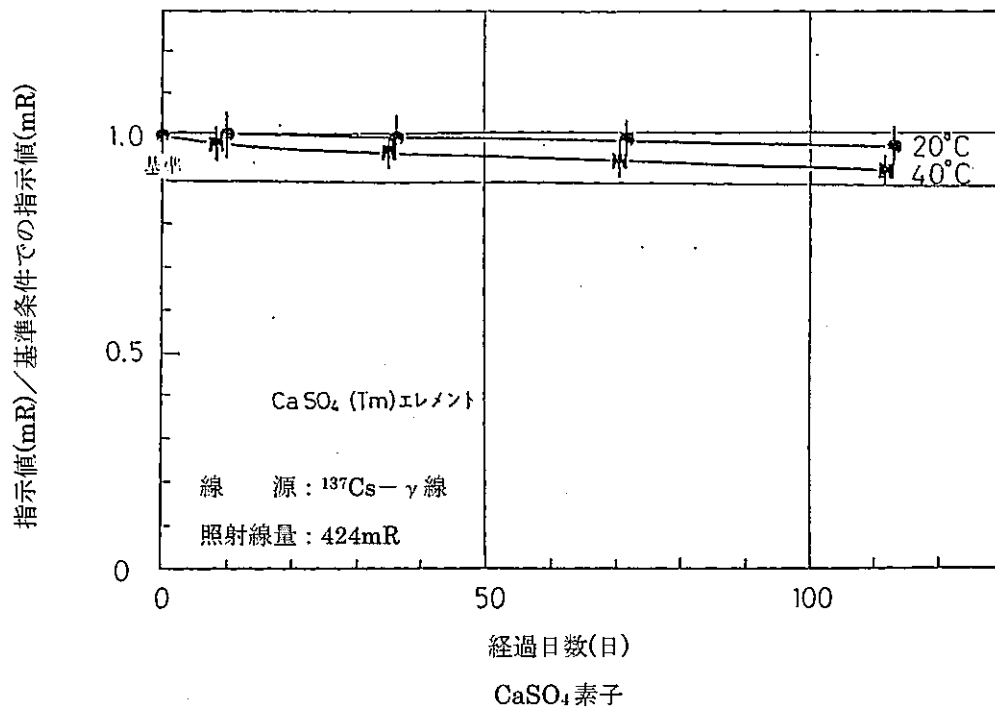
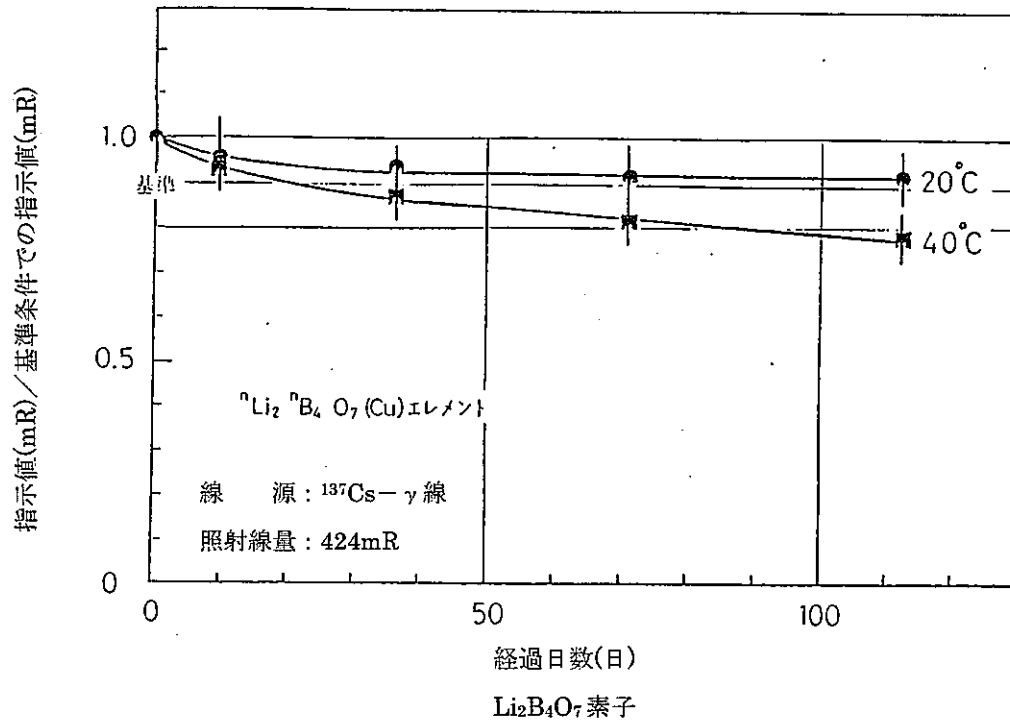
CaSO₄ 素子(縦方向)



CaSO₄ 素子(横方向)

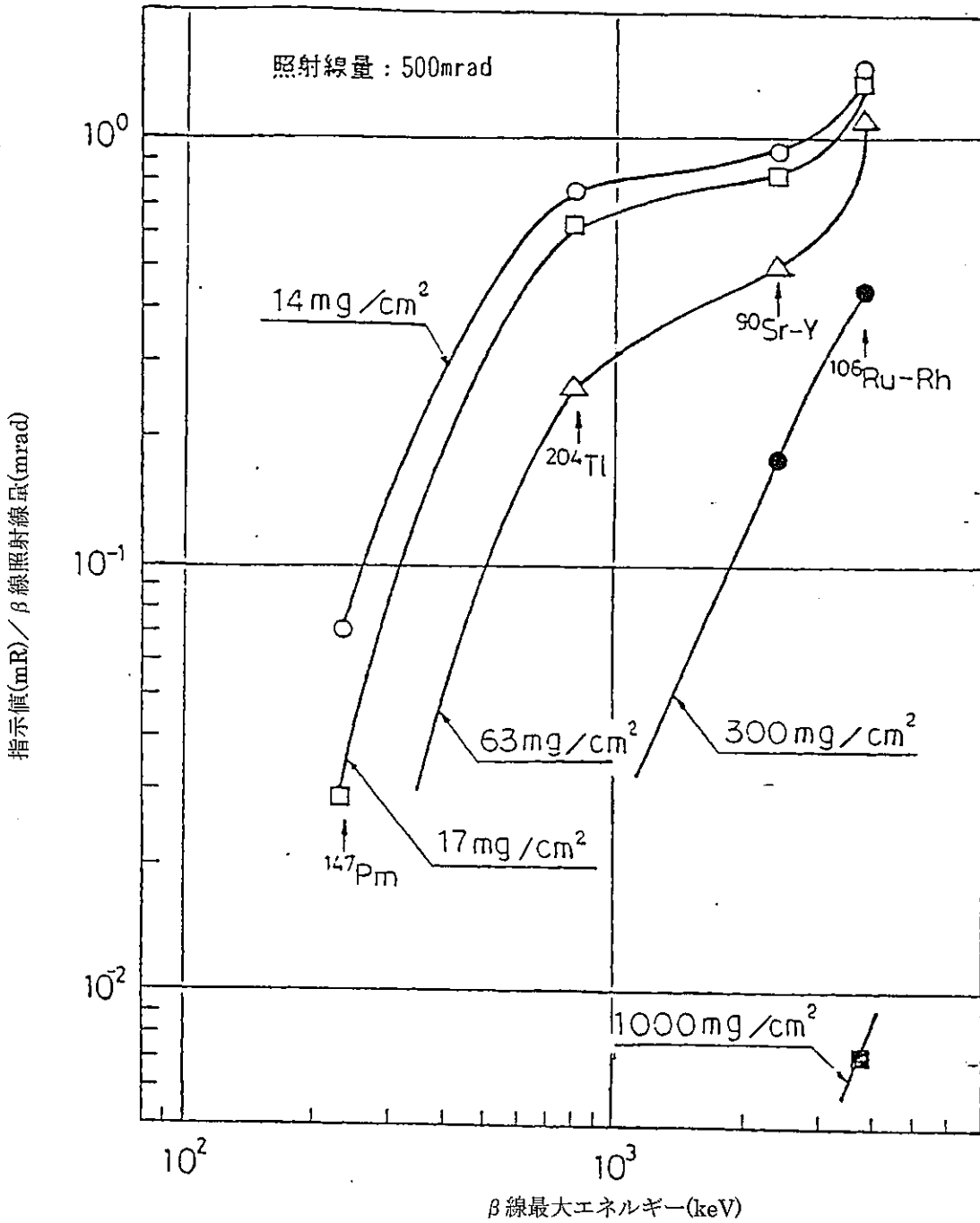
(4) フェーディング特性

JISではフェーディングの許容範囲を90日20°Cで15%、40°Cで25%以内としている。
 (評価値の経時変化試験)



(5) β線のエネルギーレスポンス

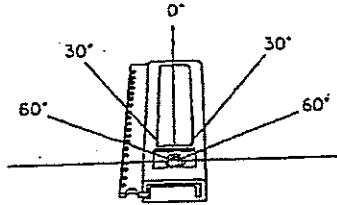
JISでは、⁹⁰Sr-⁹⁰Y β線に対する²⁰⁴Tl β線のレスポンスの許容範囲を±30%以内としている。



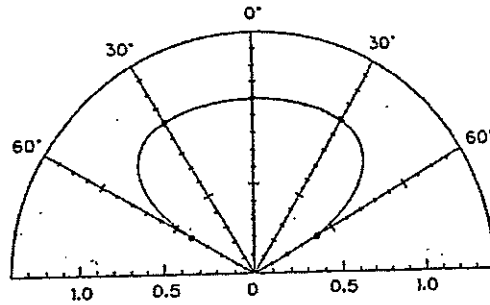
Li₂B₄O₇素子のエネルギーレスポンス

(6) β 線の方向依存性 (参考データ)

β 線の方向依存性についてJISに規定はない。データは CaSO_4 素子の試験データであるが、JNCタイプの線量計では、 β 線測定に $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 素子を用いている。

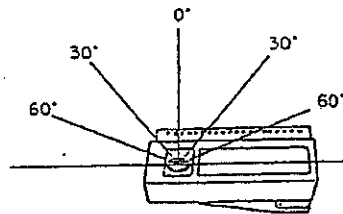


$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$

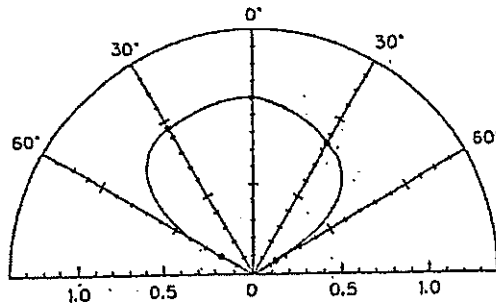


CaSO_4 素子(横方向)

正面を1.0として規格化



$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$



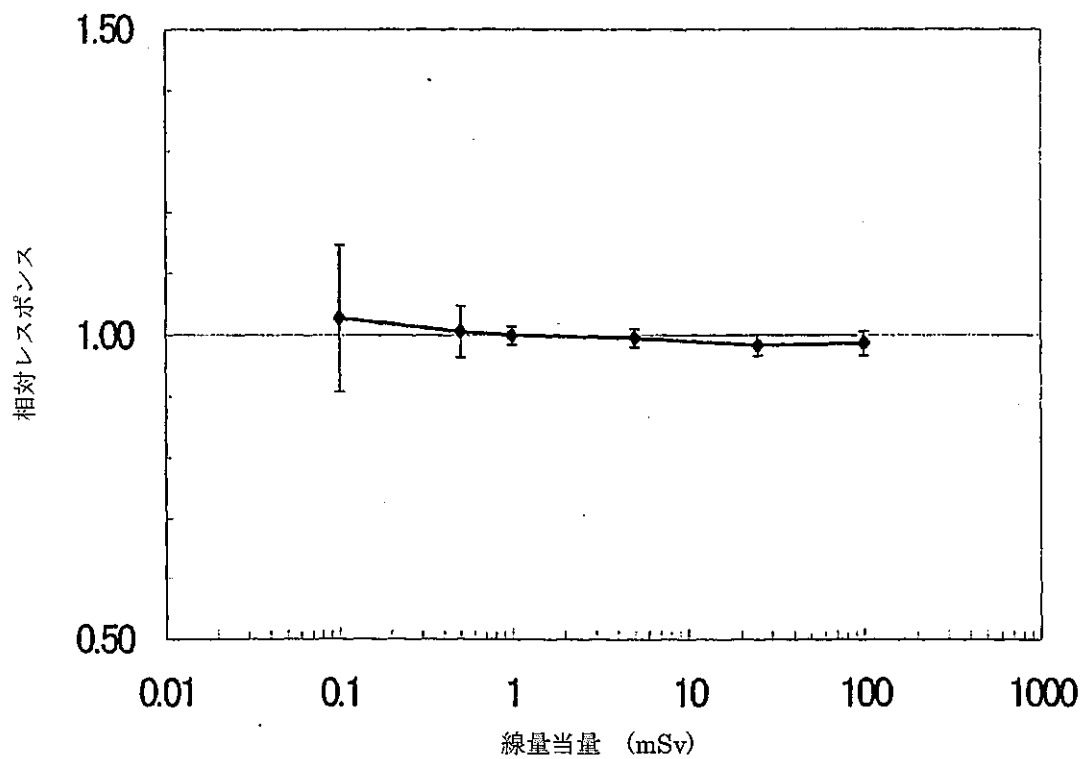
CaSO_4 素子(縦方向)

正面を1.0として規格化

2) OSL 線量計

(1) γ 線 線量直線性

下図は 1mSv 照射時の値で規格化されている。

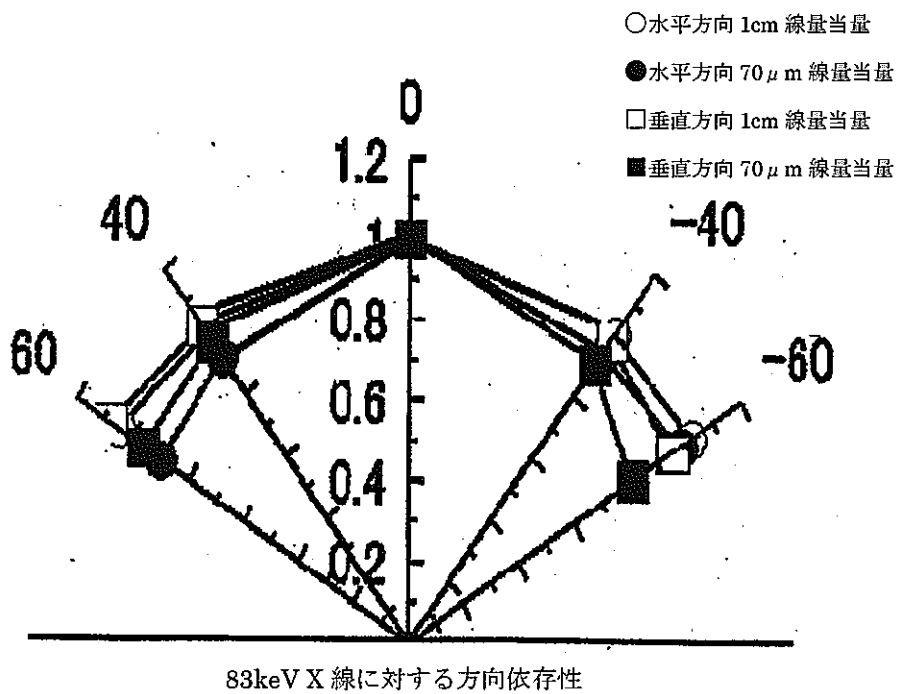
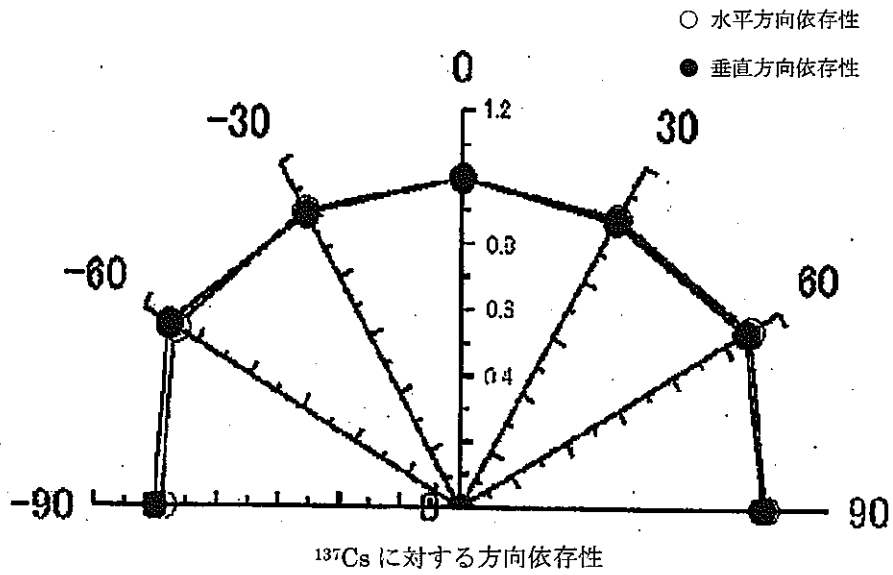


^{137}Cs γ 線に対する線量直線性

(2) γ (X)線方向依存性

^{137}Cs γ 線に対する方向依存性は極めて良好である。

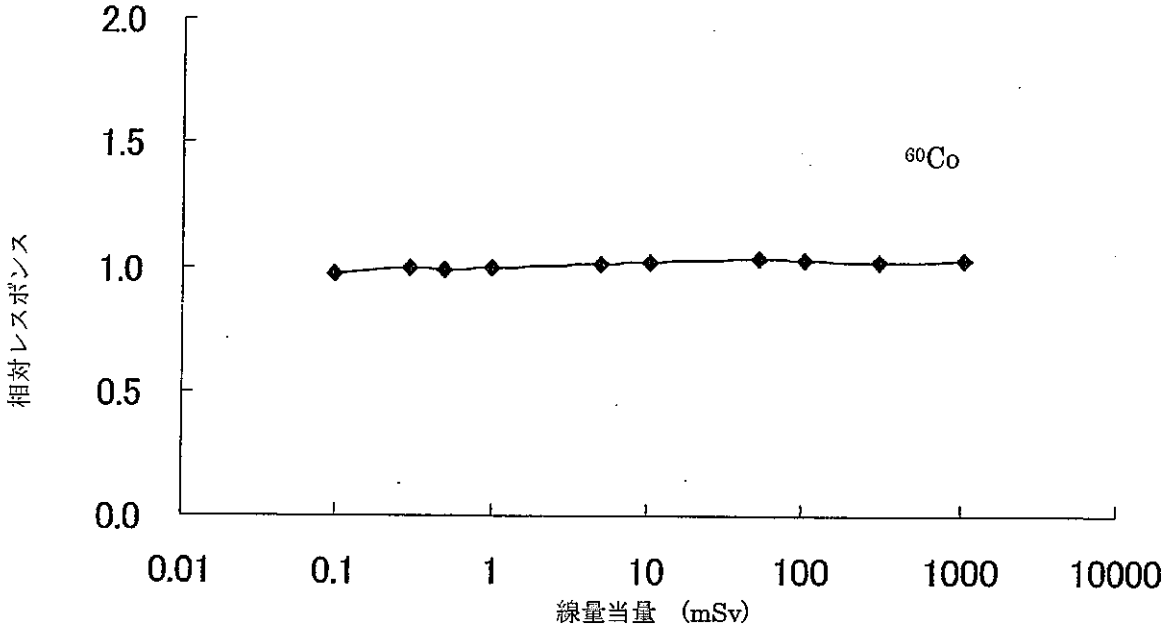
(但し、測定サービスで使用しているホルダーを使用)



3) ガラス線量計

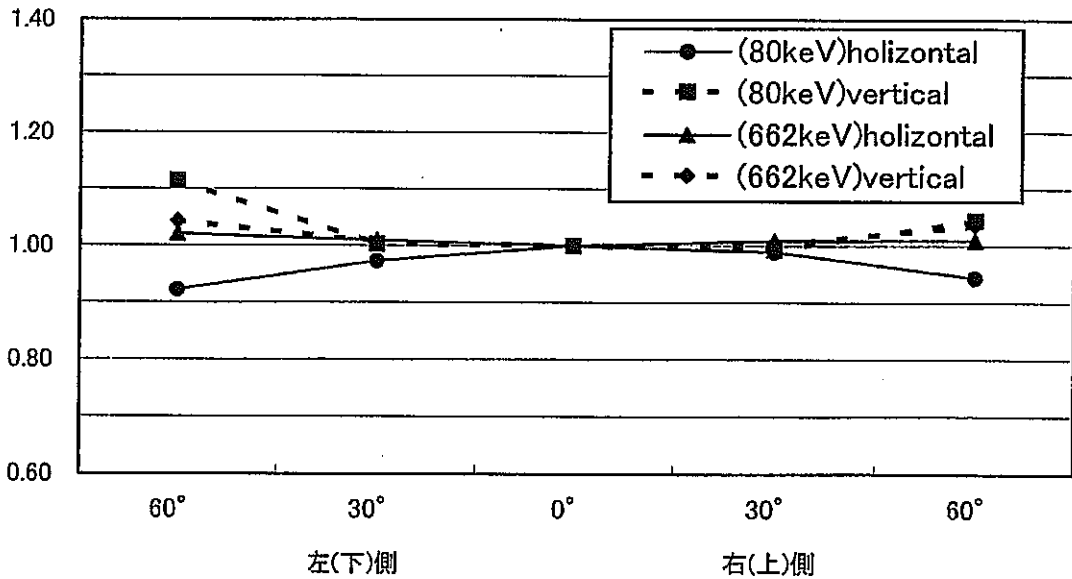
(1) γ 線 線量直線性

下図は、1mSv 照射時の値で規格化されている。JIS では 1mSv で規格化した時のレスポンス変化の許容範囲を $100\mu\text{Sv}$ で $\pm 30\%$ 、他の線量(0.3、0.5、10、100mSv)で $\pm 10\%$ 以内としている。



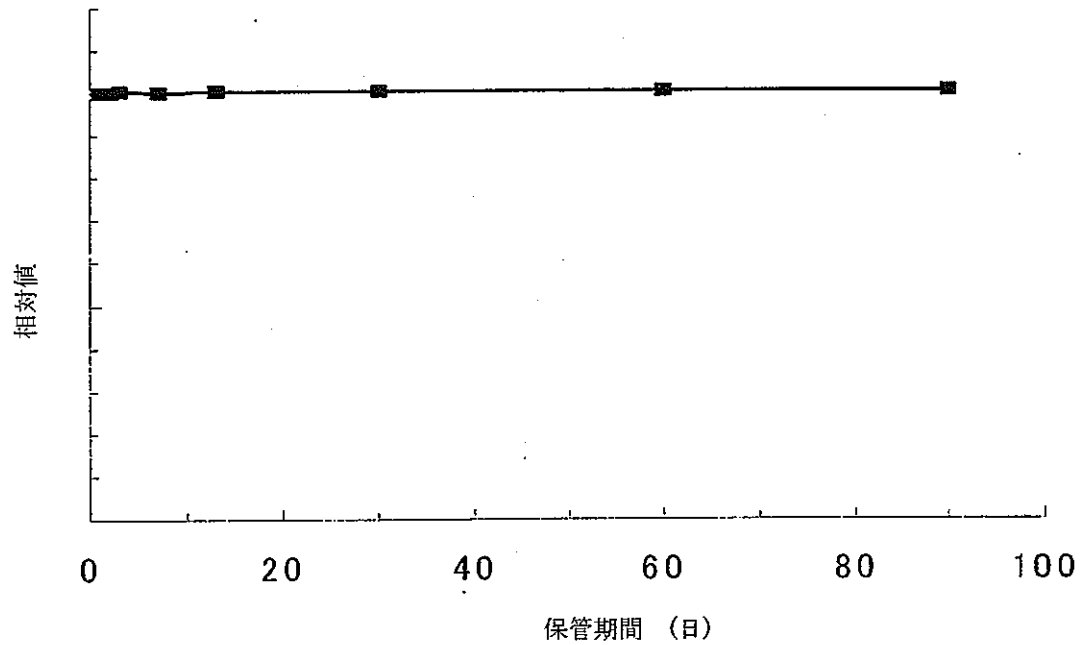
(2) γ (X)線 方向依存性

JIS では、 ^{137}Cs の γ 線を使用して上下左右 $\pm 60^\circ$ の範囲における許容範囲を $\pm 20\%$ 以内としている。また、80keV 付近の X線に対しては許容範囲を定めていない。



(3) フェーディング特性

JISでは、フェーディングの許容範囲を90日で-5%~15%としている。このデータからはフェーディングを確認できない。(経時変化特性試験)



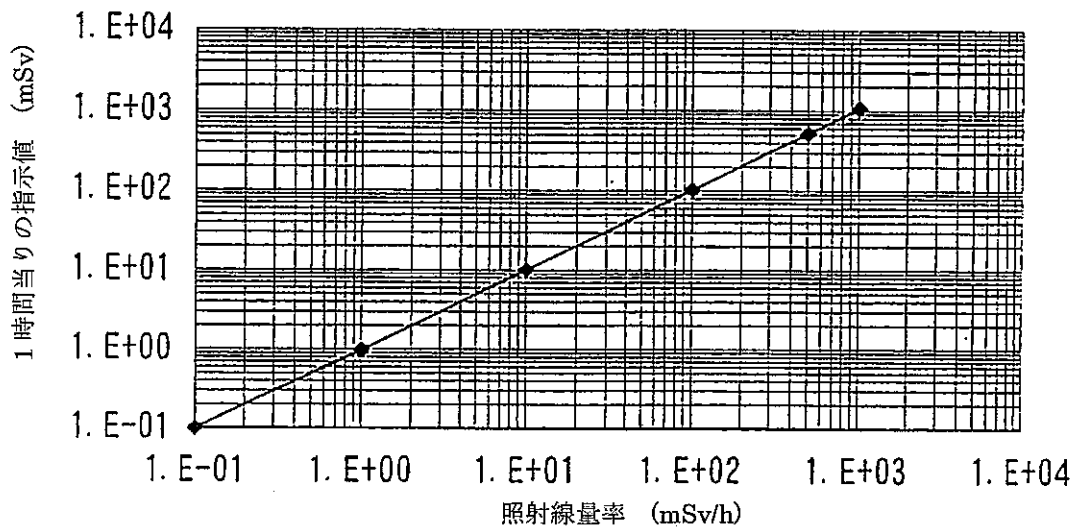
4) EPD

(1) γ 線 線量率直線性

下図は 0.1mSv/h 照射時の値で規格化されている。

JIS では、線量率測定の場合の相対基準誤差の許容範囲として、有効測定範囲において $\pm 20\%$ としている。メーカー基準では許容範囲を $\pm 10\%$ 以内としている。

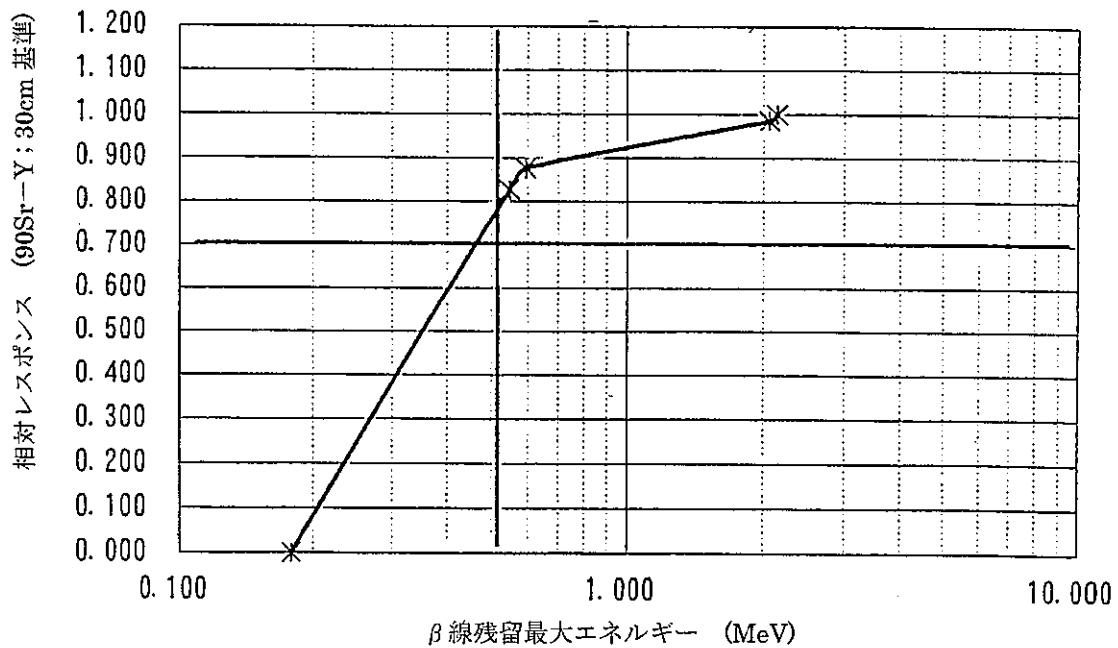
線量直線性(γ 線)



(2) β 線のエネルギーレスポンス

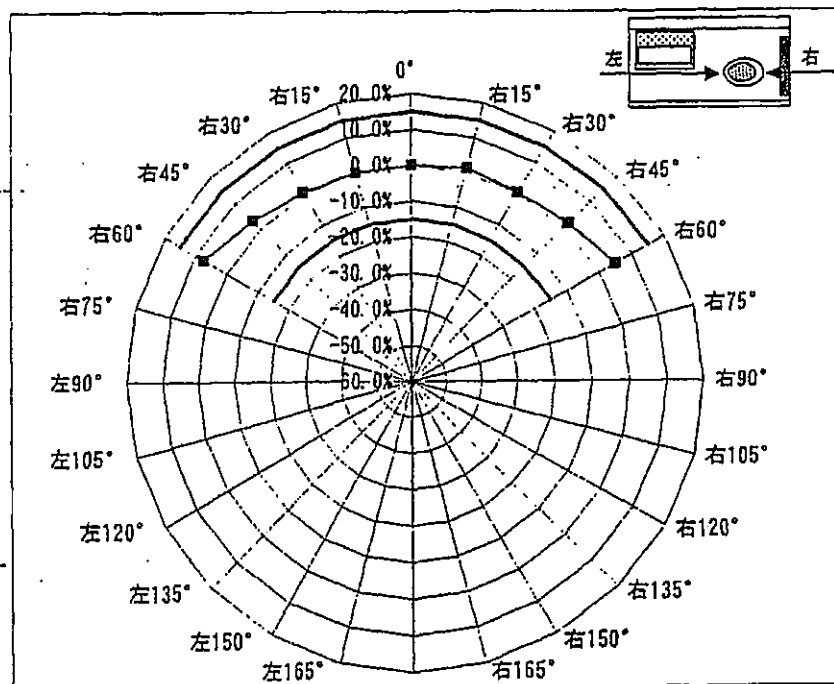
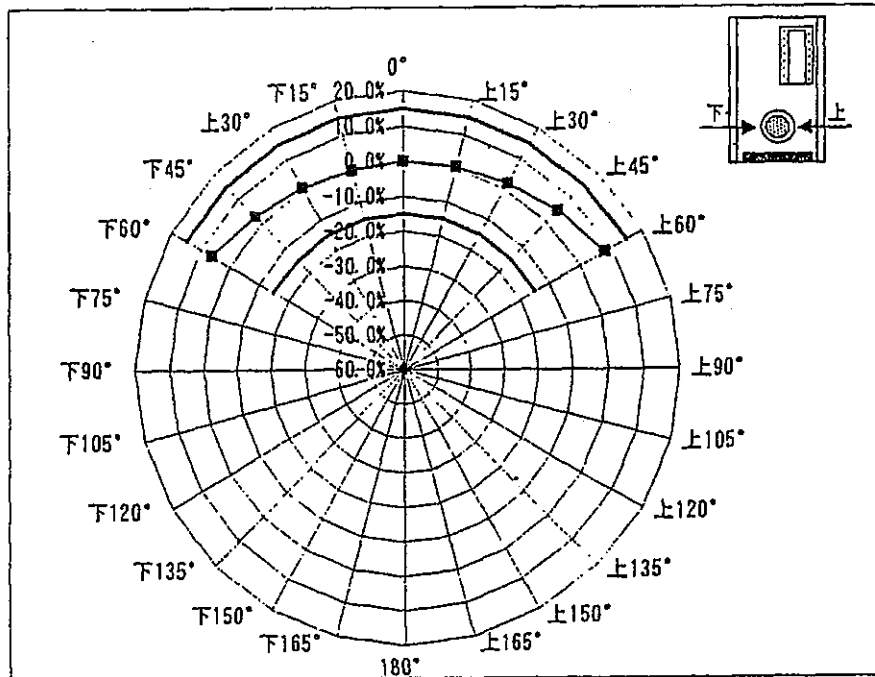
下図は $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ で規格化されている。

JIS では、500keV \sim 2.2MeV において $\pm 30\%$ 以内としている。



(3) γ 線 方向依存性

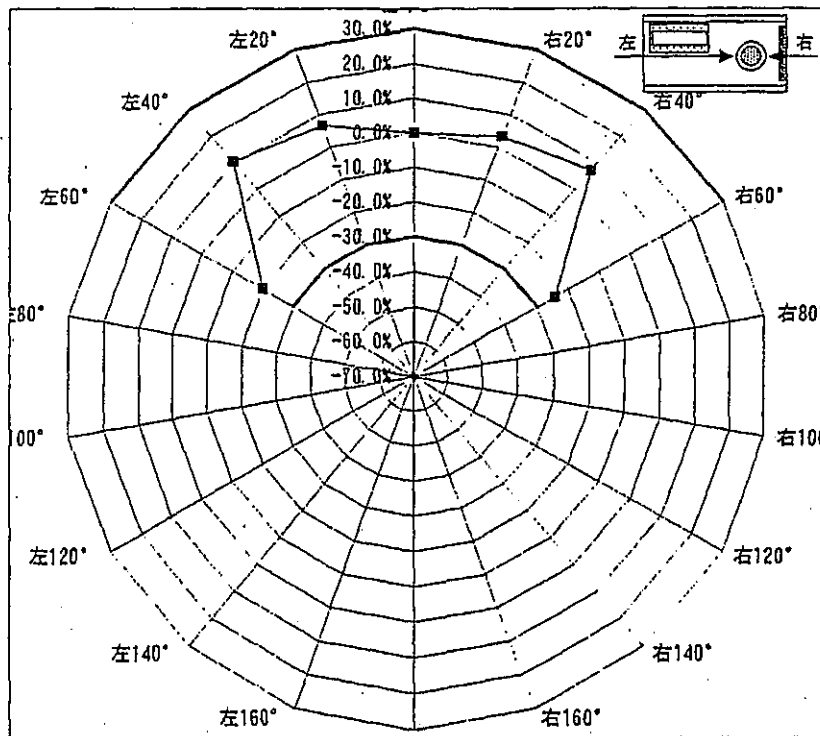
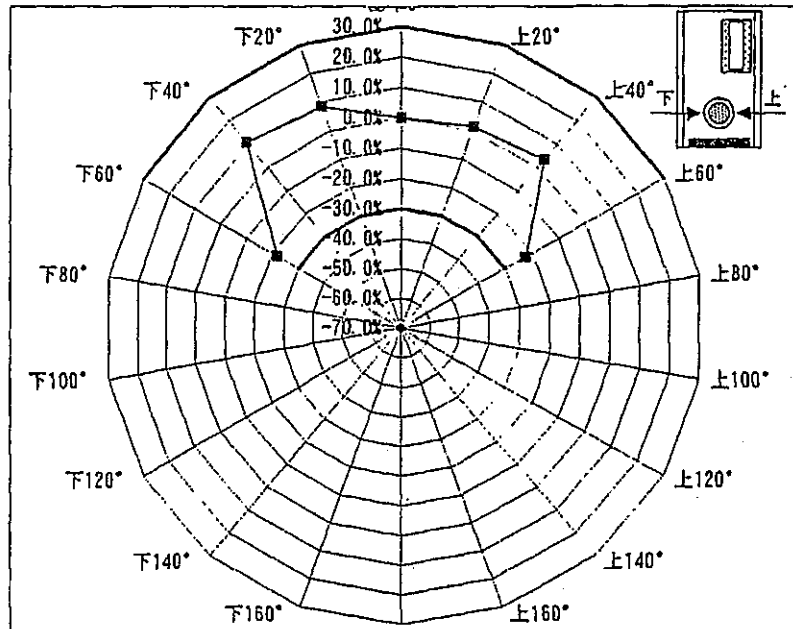
JIS では、 ^{137}Cs の γ 線を使用して上下左右 $\pm 60^\circ$ の範囲で許容範囲における $\pm 20\%$ 以内、同条件における ^{241}Am の γ 線では $\pm 50\%$ 以内としている。



γ 線 の 方向 依存 性

(4) β 線 方向依存性

JIS では ^{90}Sr - ^{90}Y の β 線を使用して上下左右 $\pm 60^\circ$ の範囲における許容範囲を $\pm 30\%$ 以内としている。



β 線 の 方 向 依 存 性

表-I 各線量計のJIS規格一覧

線量計	JIS 番号	正式名称	最終履歴	備考
TLD	Z-4320	熱ルミネセンス線 量計測装置 ($\beta \cdot \gamma$)	1995-02-01 改正 2000-06-20 確認	中性子線の規定 は盛り込まれて いない。
OSL 線量計	Z-4339	光刺激ルミネセン ス線量計測装置	昨年度審議終了 2004-4-1 発行予定	中性子線の規定 を盛り込む予定 はなし。内容はガ ラスとほぼ同じ。
ガラス 線量計	Z-4314	蛍光ガラス線量計 測装置	2002-03-20 改正	
EPD	Z-4312	X線、 γ 線、 β 線 及び中性子用電子 式個人線量(率)計	2002-03-20 改正	
固体飛跡 検出器	Z-4416	中性子用固体飛跡 個人線量計	審議中	

付録-2 電子線量計の性能比較

付録-2 電子線量計の性能比較

日本製の電子線量計は4社から発売されている。各社の製品について代表的な仕様の一覧を表-Ⅱに示す。

表-Ⅱ EPD仕様の一覧

メーカー 線種	A社			B社			C社			D社		
	γ線	β線	n線	γ線	β線	n線	γ線	β線	n線	γ線	β線	n線
エネルギー	17keV~6MeV	250keV~1.5MeV	50keV~10MeV	40keV~2MeV		0.1keV~10MeV	60keV~6MeV	500keV~2.3MeV	0.025eV~10MeV	60keV~6MeV	500keV~2.3MeV	0.025eV~10MeV
特性	±30% ¹³⁷ Cs γ線基準 [検出範囲 15keV~10MeV]	±30% ⁹⁰ Sr-Y β線基準	約±30% [検出範囲 0.025eV~15MeV]	±20% ¹³⁷ Cs γ線基準	測定不可	-50~+200% ²⁴¹ Am-Be 中性子線基準 [検出範囲 0.025eV~15MeV]	±20% ¹³⁷ Cs γ線基準 [検出範囲 50keV~6MeV]	±30% ⁹⁰ Sr-Y β線基準 [検出範囲 300keV~2.3MeV]	±50% 熱中性子線基準	±20% ¹³⁷ Cs γ線基準 [検出範囲 50keV~6MeV]	±30% ⁹⁰ Sr-Y β線基準 [検出範囲 500keV~2.3MeV]	-50~+150% ²⁵² Cf 中性子線基準 [検出範囲 0.025eV~15MeV]
誤差	±10% ¹³⁷ Cs γ線基準	±20% ⁹⁰ Sr-Y β線基準	記載なし	記載なし	記載なし	±40%	±10% ¹³⁷ Cs γ線基準	±15% ⁹⁰ Sr-Y β線基準	±20% ²⁵² Cf 中性子線基準	±10% ¹³⁷ Cs γ線基準	±20% ⁹⁰ Sr-Y β線基準	±20% ²⁵² Cf 中性子線基準
測定範囲	1 μSv~16Sv			0.01 μSv~1Svのうち5桁~7桁の範囲			0.01mSv~1Sv			γ:0.01mSv~1Sv		
線量率表示	0 μSv/h~4Sv/h			×			×			×		
重量	β・γ用95g γ・n用110g			50g~120g			3線種用110g			3線種用120g		
電池	乾電池			専用コイン型リチウム電池(CR2450)			リチウムイオン2次電池(3年間使用可)			ニッカド電池(400サイクル又は1年間使用可)		
電池寿命	3.6Vリチウム電池で3ヶ月(1日8時間使用) 待機状態で9ヶ月			連続使用1ヶ月			連続使用16時間(充電3時間)			連続使用12時間(充電1時間)		
警報	20cm離れて97dB			有			20cm離れて100dB			20cm離れて100dB		
温度	-10℃~40℃			高温不可			0℃~50℃			0℃~55℃		
湿度	20%~90%(結露なし)			多湿不可			40%~90%			35%~90%		
衝撃	1.5mからの落下			衝撃不可			1.5mからの落下			1.5mからの落下		
出入管理	出入り管理不可、一時立ち入り用			出入り管理不可、一時立ち入り用			出入り管理システム有 評価用線量計として使用可			出入り管理システム有 評価用線量計として使用可		
その他	電池なしでデータ10年間保持 ピーク線量率及び発生時間を記録 直近の23個のアラームその他イベントの情報記録可 γ・nのトレンド情報記録			誤作動防止機構なし さまざまな仕様が販売されている			不揮発メモリ有 耐静電気: 直接放電にて10keVに対し誤作動なし 耐電磁波: PHS密着による誤作動なし 耐防水: ※1JIS保護等級4級 個人線量情報・作業情報記録 トレンド情報記録 無線通信可			不揮発メモリ有 耐静電気: 6keV 耐電磁波: PHSを5cm離す必要有 [実際には電波影響が無いことを確認してから出荷している。] 耐防水: ※2JIS保護等級1級 個人線量情報・作業情報記録 トレンド情報記録、無線通信可		

※1 JIS保護等級4級 機器を正規の取付状態にして、その上方300~500mmの高さから、鉛直から両側180度までの全範囲にわたって、じょうけいを用いて散布しても、機器の内部に正常な動作を阻害するような浸水がないこと。

※2 JIS保護等級1級 機器を正規の取付状態にして、その上方200mm以上の高さから、毎分1mm以上の降水量で10分間水を滴下しても、機器の内部に正常な動作を阻害するような浸水がないこと。