



OSL型リングバッジの開発

Development of Ring Type Dosemeter Using OSL Elements

宮内 英明 吉富 寛 佐藤 義高 橘 晴夫 高橋 史明

Hideaki MIYAUCHI, Hiroshi YOSHITOMI, Yoshitaka SATO
Haruo TACHIBANA and Fumiaki TAKAHASHI

東海研究開発センター
原子力科学研究所
放射線管理部

Department of Radiation Protection
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

March 2011

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

OSL型リングバッジの開発

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

原子力科学研究所 放射線管理部

宮内 英明、吉富 寛、佐藤 義高、橘 晴夫、高橋 史明⁺

(2010年12月17日 受理)

原子力規制関係法令では、外部被ばくによる線量が最大となるおそれのある部位が体幹部以外の部位である場合には、当該部位について70 μ m線量当量を測定することが定められている。原子力科学研究所では、特に β 線源及び γ (X)線源の混在施設での除染作業等における手の末端部被ばくに注意が必要となり、熱ルミネセンス線量計を用いたリングバッジにより測定してきた。今回我々は、長期間の使用、繰返し読取りが可能である等の特徴を有する光刺激ルミネセンス(OSL)線量計を用いた新たなリングバッジを開発し、照射試験及びモンテカルロシミュレーション計算によりその特性を検証し線量評価手法を確立した。

Development of Ring Type Dosemeter Using OSL Elements

Hideaki MIYAUCHI, Hiroshi YOSHITOMI, Yoshitaka SATO, Haruo TACHIBANA
and Fumiaki TAKAHASHI⁺

Department of Radiation Protection,
Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2010)

Regulations on nuclear power state requirements for measurements of personal dose equivalent at the depth of 70 micrometers (70 μ m dose equivalent) for external exposures, where the maximum dose can be appeared at body parts except the torso. In the Nuclear Science Research Institute (NSRI) in the Japan Atomic Energy Agency, exposures to fingertips can be significant in radiological decontamination at the facilities with mixture fields of beta and gamma (X) rays. The radiation doses to fingertips have been measured by ring type dosimeters equipped with thermoluminescence dosimeters (TLD) in NSRI. In this study, we developed a new ring type dosimeter using Optically Stimulated Luminescence (OSL) elements, which has the advantages in the use for long term and repeating in dose measurements compared to the TLDs. The dose evaluation method with the new ring type dosimeters was established with studies on the characteristic of the OSL dosimeters by irradiation examinations and Monte Carlo simulations.

Keywords: Optically Stimulated Luminescence, OSL, nanoDot, Separate Evaluation, Energy Dependence, Dose Dependence Linearity, Dose Evaluation

⁺ Division of Environment and Radiation Sciences, Nuclear Science and Engineering Directorate

目 次

1. 序論	1
2. OSL型リングバッジの設計	1
2.1 リングバッジの概要	1
2.2 照射試験	2
2.3 シミュレーション計算	2
2.4 リングバッジの構成	3
3. 特性試験	3
3.1 照射条件	3
3.2 試験項目及び照射方法	3
3.2.1 基本特性試験	3
3.2.2 単体特性試験	4
3.3 結果及び考察	4
3.3.1 基本特性	4
3.3.2 単体特性	5
4. 線量評価手法の確立	6
4.1 線量換算定数	6
4.2 線量評価式	6
4.2.1 基本評価式	6
4.2.2 高エネルギー β 線の線量評価	7
4.2.3 低エネルギー β 線の線量評価	7
4.2.4 低エネルギー γ (X)線の線量評価	8
5. まとめ	8
謝辞	9
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Design of Ring Type Dosemeter	1
2.1 Outline of Ring Type Dosemeter	1
2.2 Irradiation Test	2
2.3 Simulation	2
2.4 Composition of Ring Type Dosemeter	3
3. Characteristic Test	3
3.1 Irradiation Conditions	3
3.2 Testing Categories and Method	3
3.2.1 Basic Characteristics	3
3.2.2 Characteristics of OSL Element	4
3.3 Results and Discussion	4
3.3.1 Basic Characteristics	4
3.3.2 Characteristics of OSL Element	5
4. Establishment of Dose Evaluation Method	6
4.1 Dose Conversion Factor	6
4.2 Dose Evaluation Formula	6
4.2.1 Standard Dose Evaluation Formula	6
4.2.2 For High Energy Electrons	7
4.2.3 For Low Energy Electrons	7
4.2.4 For Low Energy Gamma rays and X rays	8
5. Conclusion	8
Acknowledgements	9
References	9

表リスト

Table 2.1	フィルタ用素材及び構成	10
Table 2.2	フィルタ用素材ごとの照射試験結果	10
Table 3.1	繰り返し読取り時のばらつきの変化	11
Table 3.2	読取り値のばらつき	11

図リスト

Fig 1.1	nanoDot (左) 及び microStar (右) の外観	12
Fig 2.1	シミュレーションによる放射線照射に関する体系の描画例	12
Fig 2.2	シミュレーションによる単色電子のエネルギー沈着量	13
Fig 2.3	リングバッジの構成	13
Fig 3.1	β 線に対するエネルギー特性	14
Fig 3.2	光子に対するエネルギー特性	14
Fig 3.3	β 線に対する線量直線性	15
Fig 3.4	γ 線に対する線量直線性	15
Fig 3.5	経時変化	16
Fig 3.6	バックグラウンド値の変化	16
Fig 4.1	シミュレーションによる β 線エネルギー特性	17
Fig 4.2	真空中で電子を入射した場合の沈着割合R	17

This is a blank page.

1. 序論

原子力科学研究所（以下「原科研」という。）には種々の放射線取扱施設があり、特に原子炉用燃料を取り扱うような施設（ β 線源及び γ (X)線源混在施設）における除染作業等では、手の末端部被ばくに注意が必要となる。原子力規制関係法令において、外部被ばくによる線量が最大となるおそれのある部位が体幹部以外の部位である場合には、当該部位について $70\mu\text{m}$ 線量当量（以下「Hp(0.07)」という。）を測定することが定められており、原科研では、熱ルミネセンス線量計（以下「TLD」という。）を用いたリングバッジの外部委託により測定を実施してきた。しかし、TLDについては、フェーディングの影響が大きく長期間の使用ができないこと、繰返しの読取りができないこと、評価結果を得るまでに時間を要することなどの課題を抱えていた。

近年、光刺激ルミネセンス（Optically Stimulated Luminescence、以下「OSL」という。）現象を利用した線量計測¹⁾が使われ始めている。この現象を利用したOSL線量計は、蛍光体である放射線検出素材として一般に炭素添加 α 酸化アルミニウム（ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ ）が用いられ、放射線を受けた酸化アルミニウムが放射線に比例した情報を蓄え、強い光で刺激されると受けた放射線量に比例した量の蛍光を発し、線量計測が可能となる。OSL線量計は、フェーディングがわずかで長期間の使用ができること、繰返しの読取りができること、線量計の読取り及び再生処理に熱を使わないことなど、一般にTLDよりも利便性が高い²⁾ことが知られている。米国LANDAUER社は、OSL線量計を用いた放射線治療時の患者の被ばく線量測定用の「nanoDot」³⁾を開発した。nanoDotは、 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 2\text{mm}$ の遮光ケースに、シート状の炭素添加 α 酸化アルミニウムをポリエチレンで覆った厚さ 0.3mm 、 $\phi 7\text{mm}$ の円形の素子をもち、小型かつ軽量で耐水性が高いという特徴がある。nanoDotの外観をFig 1.1に示す。

我々は、nanoDotの特徴に着目してリングバッジへの応用を検討し、長瀬ランダウア(株)及びLANDAUER社の協力を得て、新たなOSL型のリングバッジを開発した。

本報告は、今回の試験データ等から得られた特性並びに線量評価手法等の開発結果をまとめたものである。

2. OSL型リングバッジの設計

本リングバッジは、 β 線及び γ (X)線混在場における手の末端部のHp(0.07)を評価するため、 β 線と γ (X)線を分離評価することを目的としている。以下に、本リングバッジの設計にあたり実施した放射線照射試験等の結果について述べる。

2.1 リングバッジの概要

1つのリングバッジで β 線と γ (X)線を分離評価するためには、2つ以上の線量計を内包する必要がある。しかし、リングバッジが大きくなると作業性が悪化するおそれがあることから、nanoDotを2枚重ねて内包し、バッジ自体を小型にすることを考案した。また、 β 線と γ (X)

線とを分離する方法として、2枚の nanoDot の間に β 線の透過を抑えるフィルタ（以下「フィルタ」という。）を挟み、1枚目の nanoDot（入射側。以下「1枚目 nanoDot」という。）で β 線及び γ (X) 線を検出し、2枚目の nanoDot（身体側。以下「2枚目 nanoDot」という。）で γ (X) 線のみを検出する構造とした。

フィルタの素材を選定するための照射試験及びフィルタ性能確認のためのシミュレーション計算について、以下に述べる。

2.2 照射試験

フィルタについては、2枚目 nanoDot への β 線の透過を抑える性能及びリングバッジの小型化のための薄さが求められることから、その素材を選定するため原科研の放射線標準施設棟で、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ （残留最大エネルギー：2.06MeV）を用いた β 線照射試験を実施した。照射する線量は、Hp(0.07) に基づく任意線量とした。フィルタの種類については、過去にフィルムを用いたリングバッジの開発を行った経験と入手及び加工のし易さから、Table 2.1 に示すフィルタなしの状態を含む1つ又は2つの素材の組合せで5組用意した。照射にあたっては、2枚の nanoDot とその間にフィルタを重ねた状態で、1組につき3セットの線量計を用意して実施した。基準照射前後の読取りには、LANDAUER 社製「microStar」を用い、照射後の読取りは照射から24時間経過後に実施した。読取り結果は、3セットの平均及び標準偏差とした。また、nanoDot の再生処理⁴⁾は、紫外線カットフィルムを被せた蛍光灯下で約6時間かけて実施した。

最初に、フィルタがない場合と銅のみの場合の試験を実施した。フィルタがない場合は、1枚目 nanoDot の読取り値の約60%が2枚目 nanoDot へ透過した。フィルタが銅のみの場合は、1枚目 nanoDot の読取り値がフィルタのない場合よりも明らかに増加している。これは、 β 線が銅により後方散乱し、1枚目 nanoDot の読取り値が見かけ上大きくなっているためと考えられる。そこで、後方散乱を抑えるために2種類の素材を組み合わせることで試験を実施したところ、アルミニウムを1枚目 nanoDot 側に、銅を2枚目 nanoDot 側に組み合わせたフィルタが、 β 線の遮へい効果は高く β 線の後方散乱の影響は低くなった。照射試験結果を Table 2.2 に示す。

2.3 シミュレーション計算

放射線標準施設棟では照射できない高エネルギー電子線に対するフィルタの性能及びフィルタ素材の妥当性を確認するため、モンテカルロシミュレーション計算を実施した。計算コードとしては、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS⁵⁾を用いた。粒子・重イオン輸送計算コードは、広範囲のエネルギーに対応し、核反応モデル及びデータを用いて任意の体系中における電子、光子、重イオン等の挙動を模擬することができる。Table 2.1 に示した3種類のフィルタ（②銅のみ、③アルミニウム+銅、④アクリル+銅）について、単色電子を1.4–3.0MeVのエネルギーで照射し、1枚目 nanoDot 及び2枚目 nanoDot へのエネルギー沈着量を計算した。照射ジオメトリは、nanoDot から約30cm離れた場所に、2cm四方の面線源を仮定し、真空中を平行ビームとして照射した。面線源と nanoDot の中心は一致させた。リングバッジモデルへの放射線照射に関する体系の描画例を Fig 2.1 に示す。

計算結果から、1枚目 nanoDot は、1.4–3.0MeVのエネルギー範囲でレスポンスが一定にな

ると期待されることを確認した。一方 2 枚目 nanoDot では、全てのフィルタ条件について、電子線エネルギーが大きくなるにつれてエネルギー沈着量が増加しており、2.0MeV を超えると過大検出される可能性があり、 γ (X)線の線量評価時は補正が必要であることを確認した。フィルタの性能については、3 種類中ではアルミニウムと銅の組合せが電子線を最も透過させていない結果となり、2.2 項の照射試験結果を検証することができた。単色電子のエネルギー沈着量の計算結果を Fig 2.2 に示す。

2.4 リングバッジの構成

照射試験等の結果を考慮したリングバッジの構成を Fig 2.3 に示す。フィルタについては、電子(β 線)の遮へいが期待できるアルミニウムと銅(共に 0.5mm 厚)の組合せを選定した。リングバッジケースについては、nanoDot 及びフィルタを内包して検出性能を有する最小のサイズとして、外寸 $\phi 18 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 、内寸 $\phi 12 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ とした。キャップ部には、1 枚目 nanoDot の低エネルギー β 線の検出効率を上げるため、 $\phi 9 \text{ mm}$ の入射窓を設けた。リング部は、スリットを入れて使用者の指の太さに対応できるものとした。リングバッジケースの材質は、軽量で適度な柔軟性を有する ABS 樹脂とした。

3. 特性試験

リングバッジの設計に基づき試作品を製作し、基本特性及び単体特性試験を実施した。以下に、その方法及び結果について述べる。

3.1 照射条件

基準照射は、エネルギー特性試験についてはリングバッジの状態、その他の試験については nanoDot 単体で実施した。リングバッジの状態での照射は、フィルタとしてアルミニウムと銅の組合せを用い、ISO4037-3 に準拠⁶⁾したロッドファントムに装着して実施した。照射時の校正基準点の位置はロッドファントム表面とし、1照射につき 3 個のリングバッジを装着した。その他 nanoDot の読取り等は 2.2 項で述べた方法と同じである。

3.2 試験項目及び照射方法

3.2.1 基本特性試験

(1) エネルギー特性

β 線に対する特性は、 ^{204}Tl (残留最大エネルギー : 0.64MeV) 及び $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (残留最大エネルギー : 2.06MeV) の β 線をそれぞれ 1mSv 照射して求めた。 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ については、線源とリングバッジの間に 6mm 及び 4mm 厚の亚克力遮へい材を置き、 β 線残留最大エネルギーを 0.88MeV 及び 1.35MeV に減衰させた照射も実施した。照射後の読取りは、1 枚目 nanoDot について実施した。

光子に対する特性は、ISO4037-1 の Narrow series に準拠⁷⁾して整備されている中硬 X 線

発生装置で線質指標(QI) 0.8のX線を5種(実効エネルギー:23.9、48.2、80.5、120、199keV)並びに¹³⁷Cs(662keV)及び⁶⁰Co(実効エネルギー:1250keV)から放出されるγ線をそれぞれ1mSv照射して求めた。照射後の読取りは、1枚目 nanoDot 及び2枚目 nanoDot について実施した。

(2) 線量直線性

線量直線性は、ロッドファントムに nanoDot を直接貼り付け、⁹⁰Sr/⁹⁰Y のβ線及び⁶⁰Coのγ線を用いて0.5、1、5、10、100mSvを照射して求めた。

3.2.2 単体特性試験

(1) 読取りによる光フェーディング及び最適な読取り回数

nanoDot は、読取り時の光によって読取り値のわずかな減少がある⁸⁾とされている。その現象を把握するため、任意線量を照射した nanoDot 1枚を連続45回読取り、読取り値の減少率を求めた。また、任意線量を照射した10枚の nanoDot をそれぞれ10回読取り、平均値の変化率及びばらつきを評価し、光フェーディングを考慮した最適な読取り回数を求めた。

(2) 経時変化特性

経時変化の有無を確認するため、3.2.1項(2)で照射した nanoDot を照射から1月毎に3月経過時点まで読取り、3.2.2項(1)で確認した読取り時のフェーディングの補正を行うことにより、読取り値の変化率を求めた。経時変化確認中の nanoDot は、常時鉛容器内に保管し、読取り時のみ容器から取り出した。

(3) 検出下限値

検出下限値については、1日あたりのバックグラウンド線量及び読取り値のばらつきを考慮して求めた。バックグラウンド線量は、原科研内の居室に約50日保管していた nanoDot 6枚を毎日(休日を除き)読取り、3.2.2項(1)で確認した読取り時のフェーディングの補正を行うことにより、その変化を求めた。読取り値のばらつきについては、任意線量を照射した nanoDot 10枚の読取りにより、変動係数を求めた。

3.3 結果及び考察

3.3.1 基本特性

(1) エネルギー特性

β線に対するエネルギー特性を Fig 3.1 に示す。レスポンスは2.06MeVに対する読取り値で規格化した。その試験結果から、レスポンスは、0.64MeVに対する値を除き±15%未満の範囲にあった。0.64MeVに対してレスポンスが低い理由は、nanoDot の素子を覆っている遮光ケースによりエネルギーが吸収されたためと考えられる。

光子に対するエネルギー特性を Fig 3.2 に示す。レスポンスは662keVに対する読取り値で規格化した。その試験結果から、レスポンスは、24keVのX線に対する値を除き±15%未満の範囲にあった。24keVのX線に対するレスポンスが低い理由は、フィルタによりエネルギーが吸収されたためと考えられる。

以上の結果から、本リングバッジは、広範囲なエネルギーに対して優れたレスポンスを有

すると言える。

(2) 線量直線性

β 線及び γ 線に対する線量直線性をそれぞれ Fig 3.3 及び Fig 3.4 に示す。レスポンスは 1mSv 照射したときの読取り値で規格化した。どちらも 0.5mSv から 100mSv の範囲で 2.5% 以内の偏差であり、優れた直線性を示した。

3.3.2 単体特性

(1) 読取りによる光フェーディング及び最適な読取り回数

nanoDot を連続して読取った場合の読取り値の減少率は、1 回あたり - 0.24±0.02% であり、読取り回数を重ねるごとに直線的に減少することを確認した。

繰返し読取り時の平均値からのばらつきの変化を Table 3.1 に示す。ここで、変動係数は、読取り値の標準偏差を平均値で除した値である。Table 3.1 から、1 回の読取りでも JIS 基準（最大値と最小値との比が 1.3 以下）⁹⁾を満足しているが、3-5 回の読取りを行うことで、読取り値の精度が向上することを確認した。5 回の読取りを超えると、読取りによる光フェーディングの影響を無視できない。

以上の結果から、リングバッジ 1 個当たりの読値は、原則 3 回読取った値の平均とし、大きく外れた値があると疑われる場合は 5 回まで読取った値を平均することとした。

(2) 経時変化特性

照射から 3 月経過時点までの経時変化を Fig 3.5 に示す。照射直後の読取り値からの変化率は、平均 - 4.7% であった。

以上の結果及び読取りのばらつきを考慮すると、nanoDot の経時変化は、JIS 基準（20°C の室内で 10%以下）⁹⁾と比較して十分小さく、無視できる。

(3) 検出下限値

約 50 日間におけるバックグラウンド値の変化を Fig 3.6 に示す。この結果から、1 日あたりのバックグラウンド値は、1.4[counts/day]であった。読取り値のばらつき（変動係数 S_{μ} ）については、Table 3.2 に示すとおり 0.05 であった。

以上の結果から、次式¹⁰⁾を用いて検出下限値 L_D [counts]を求めた。

$$L_D = \frac{2(t_n S_0 + t_m^2 S_{\mu}^2 B)}{1 - t_m^2 S_{\mu}^2}$$

ただし、 $S_0 = S_B (1 + 1/n)$

ここで、

n : バックグラウンドのデータ数 (6 個)

t_n : 自由度 ($n - 1$) の t 分布で信頼率 95%となる値 (2.015)

m : ばらつきのデータ数 (10 個)

t_m : 自由度 ($m - 1$) の t 分布で信頼率 95%となる値 (1.812)

B : 90 日間積算したバックグラウンド値+再生処理直後の読取り値 (144 counts)

S_0 : バックグラウンドの標準偏差

S_B : バックグラウンドの変動係数 (9.8)

上記の式から、 $L_D=48.8\text{counts}$ となり、4.1 項に述べる線量換算定数 (661counts/mSv) を用いると 0.068mSv となった。ただし、今回の結果は、原科研内のある一箇所のみのもので評価しており、他の施設におけるバックグラウンド変動幅の影響を考慮していないことから、検出下限値は、保守的に見積もり 3 月間使用で 0.1mSv とした。

4. 線量評価手法の確立

特性試験及びシミュレーション計算の結果に基づき、線量評価手法を確立した。以下に、 β 線及び $\gamma(X)$ 線の各エネルギー範囲における線量評価手法について述べる。

4.1 線量換算定数

β 線及び $\gamma(X)$ 線に対する線量換算定数 K_β 及び K_γ を求めるため、2 組のリングバッジを用意し、それぞれに $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ の β 線 (残留最大エネルギー $E_\beta=2.09\text{ MeV}$) 及び ^{137}Cs の γ 線 (エネルギー $E_\gamma=0.662\text{ MeV}$) を 5mSv 照射した。 β 線については 1 枚目 nanoDot の読取り値、 γ 線については 2 枚目 nanoDot の読取り値を用いた。読取り値は、照射前読取り値、保管場所のバックグラウンド値及び製造ロット毎の感度補正係数により補正した。

その結果、線量換算定数は、次のとおりである。

$$K_\beta = 782 \pm 47 \text{ [counts/mSv]}$$

$$K_\gamma = 661 \pm 17 \text{ [counts/mSv]}$$

4.2 線量評価式

4.2.1 基本評価式

3.3.1 項の基本特性の試験結果から、次式で β 線と $\gamma(X)$ 線を分離し、それぞれの Hp(0.07) を評価する手法を確立した。ただし、 β 線エネルギー E_β 及び γ 線エネルギー E_γ がそれぞれ $1\text{ MeV} \leq E_\beta \leq 2.2\text{ MeV}$ 、 $50\text{ keV} \leq E_\gamma \leq 2\text{ MeV}$ の範囲外であった場合は、次項以降に述べる式で線量評価が可能である。

$$H_\beta = (Y_1 - Y_2) / K_\beta$$

$$H_\gamma = Y_2 / K_\gamma - B$$

$$\text{ただし、} Y_i = (X_i - Z_i) / K_i$$

ここで、

$$H_\beta : \beta \text{ 線による Hp(0.07) 評価値 [mSv]}$$

$$H_\gamma : \gamma(X) \text{ 線による Hp(0.07) 評価値 [mSv]}$$

- K_{β} : β 線に対する線量換算定数 [counts/mSv]
- K_{γ} : γ (X)線に対する線量換算定数 [counts/mSv]
- B : 使用期間のバックグラウンドの評価値 [mSv]
- X_1 : リングバッジ使用後の1枚目 nanoDot の読取り値 [counts]
- X_2 : リングバッジ使用後の2枚目 nanoDot の読取り値 [counts]
- Z_1 : 使用前の1枚目 nanoDot の読取り値 [counts]
- Z_2 : 使用前の2枚目 nanoDot の読取り値 [counts]
- K_1 : 1枚目 nanoDot の感度補正係数
- K_2 : 2枚目 nanoDot の感度補正係数

4.2.2 高エネルギー β 線の線量評価

Fig 2.2 から、2 MeV を超える高エネルギーを持つ β 線に対して、1枚目 nanoDot は優れたレスポンスを有しているが、2枚目 nanoDot にはフィルタを透過した電子線のエネルギーが沈着していることが分かる。したがって、高エネルギー β 線が混在する場での γ (X)線による Hp(0.07)をより正確に評価するためには、補正が必要である。補正を考慮した評価式を求めるにあたり、初めに 3.3.1 項の β 線に対するエネルギー特性について、シミュレーション計算により再現することを試みた。計算コードとして EGS5¹¹⁾を用いてシミュレーション計算を実施した結果を Fig 4.1 に示す。この結果から、3.3.1 項の照射試験結果を精度良く再現できたことを確認した。

次に、真空中で単色電子及び放射性核種からのスペクトルを持つ β 線をリングバッジに入射させた場合の2枚目 nanoDot への沈着割合 R (2枚目 nanoDot への沈着量/1枚目 nanoDot への沈着量) を計算した。Fig 4.2 に示した計算結果から、1.5MeV 以上の電子については2枚目 nanoDot へ有意にエネルギーが沈着していることが明らかであるが、スペクトルをもつ β 線に対する沈着割合 R は、高エネルギー β 線放出核種である ^{106}Rh (最大エネルギー E_{β} : 3.54MeV) でも 13%程度であった。また、計算条件を空気中とした場合の沈着割合 R は、2%程度であった。

このシミュレーション計算結果から、 β 線のエネルギー E_{β} が $2.2 \text{ MeV} < E_{\beta} \leq 3.5 \text{ MeV}$ であった場合は、沈着割合 $R = 0.02$ として、次の評価式で Hp(0.07)を評価することが可能である。

$$H_{\beta} = (Y_1 - Y_2) / (1 - R) / K_{\beta}$$

$$H_{\gamma} = (Y_2 - R Y_1) / (1 - R) / K_{\gamma} - B$$

4.2.3 低エネルギー β 線の線量評価

Fig 3.1 から、1.0MeV 以下の β 線に対しては、 β 線のエネルギーが低くなるにつれてレスポンスも低くなっていることが分かる。この特性は、次の補正係数 F により記述できる。

$$F = 1 / (1 + (h / E_{\beta})^r)$$

ここで、回帰係数は $r = 7.7$ 、 $h = 0.68$ である。

補正係数 F を用いることにより、 β 線のエネルギー E_β が $0.5 \text{ MeV} \leq E_\beta < 1.0 \text{ MeV}$ であった場合は、次の評価式で $\text{Hp}(0.07)$ を評価することが可能である。

$$H_\beta = (Y_1 - Y_2) / (F \cdot K_\beta)$$

$$H_\gamma = Y_2 / K_\gamma - B$$

4.2.4 低エネルギー γ (X) 線の線量評価

Fig 3.2 から、低エネルギーの γ (X) 線のエネルギーは 1 枚目 nanoDot に吸収され、1 枚目 nanoDot が明らかに過大に検出していることが分かる。

したがって、 γ 線エネルギー E_γ が $24 \text{ keV} \leq E_\gamma < 50 \text{ keV}$ であった場合は、1 枚目 nanoDot に対する補正係数 a を Fig 3.2 から読取り求めることで、次の評価式で $\text{Hp}(0.07)$ を評価することが可能である。

$$H_\beta = (Y_1 - a Y_2) / K_\beta$$

$$H_\gamma = Y_2 / K_\gamma - B$$

$$\text{ただし、 } a = f_1 / f_2$$

ここで、

f_1 : E_γ に対する 1 枚目 nanoDot のレスポンス

f_2 : E_γ に対する 2 枚目 nanoDot のレスポンス

5. まとめ

今回開発した OSL 型リングバッジは、基準照射試験及びシミュレーション計算による検証の結果から、除染作業等で主な線源となりうる核種 ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co) はもとより、それ以外の核種に対しても精度良く β 線と γ (X) 線を分離評価することができ、レスポンス、線量直線性並びにその他単体特性について優れていることを確認した。また、別途実施した β 線源及び γ (X) 線源混在施設でのフィールド試験の結果から、リングバッジ着用上の十分な作業性が確保されていることも確認した。

本開発により、既存の体幹部用個人線量計と同等の長期間運用 (1 月間から 3 月間へ) が可能となるとともに、繰返し読取りによる評価精度向上が図れる。また、測定業務を外部委託からインハウスに移行することにより、緊急時等における線量評価時間の短縮が図れ、従来の課題を解決することができた。さらに、総合的にコストの節減も見込まれることから、平成 23 年 1 月から運用を開始する。

なお、より精度を向上させるためには、高エネルギー β 線の 2 枚目 nanoDot への透過、低エ

エネルギー γ (X)線の1枚目 nanoDot への寄与などの課題を解決する必要があるが、本リングパ
ッジは、フィルタ素材の種類及び組合せ、検出部の構成等を検討することで柔軟に対応可能と
考える。

謝 辞

本開発にあたり、長瀬ランダウア(株)並びに LANDAUER 社には OSL 線量計の技術資料及
び素材等の御協力をいただき、深く感謝する。

参考文献

- 1) S.W.S McKeever, M.W Blair, E Bulur, R Gaza, R Kalchgruber, D.M Klein and E.G Yukihara :”Recent advances in dosimetry using the optically stimulated luminescence of $Al_2O_3:C$ ”, *Radiat Prot Dosimetry*, 109, pp.269-276 (2004).
- 2) L Botter-Jensen, S.W.S McKeever and A.G Wintle “Optically stimulated luminescence dosimetry”, Elsevier, Netherlands, Amsterdam (2003).
- 3) Landauer:<http://www.landauer.com/Energy/Products/Dosimeters>(accessed2010-11-25).
- 4) 小林 育夫 :”光刺激ルミネセンス(OSL)個人線量計による線量特性評価および環境線量測定
の応用に関する研究”, 近畿大学大学院 (2003)
- 5) K Niita, T Sato, H Iwase, H Nose, H Nakashima and L Sihvere :”PHITS - a particle and
heavy ion transport code system” *Radiat. Meas*, 41, 1080-1090 (2006).
- 6) International Organization for Standardization :”X and gamma reference radiation for
calibrating doseimeters and doserate meters and for determining their response as a
function of photon energy, Part 3”, ISO 4037-3 (1999).
- 7) International Organization for Standardization :”X and gamma reference radiation for
calibrating doseimeters and doserate meters and for determining their response as a
function of photon energy, Part 1”, ISO 4037-1 (1996).
- 8) Landauer :”User manual InLight Systems”, Landauer, Illinois (2006).
- 9) 日本規格協会 :”光刺激ルミネセンス線量計測装置”, JIS Z 4339 (2004).
- 10) P.L Robertson and R.D Carlson :”Determining the lower limit of detection for personnel
dosimetry systems”, *Health Phys*, 62(1), pp2-9 (1992).
- 11) H Hirayama, Y Namito, A.F Bielajew, S.J Wilderman and W.R Nelson :”The EGS5Code
System”, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 (2005).

Table 2.1 フィルタ用素材及び構成

フィルタの素材と構成	密度 [g/cm ³]	厚さ [mm]	トータルの厚さ [mg/cm ²]
① フィルタなし	-	-	-
② 銅のみ	8.96	0.5	448
③ アルミニウム + 銅	2.69 / 8.96	0.5 / 0.5	583
④ アクリル(0.5mm) + 銅	1.19 / 8.96	0.5 / 0.5	508
⑤ アクリル(1.0mm) + 銅	1.19 / 8.96	1.0 / 0.5	567

Table 2.2 フィルタ用素材ごとの照射試験結果

フィルタの素材及び構成	microStarによる読取り値 [counts]	
	1枚目 nanoDot	2枚目 nanoDot
① フィルタなし	853 ± 21	516 ± 8
② 銅のみ	942 ± 65	16 ± 13
③ アルミニウム + 銅	866 ± 48	5 ± 4
④ アクリル(0.5mm) + 銅	942 ± 44	12 ± 7
⑤ アクリル(1.0mm) + 銅	877 ± 45	18 ± 11

Table 3.1 繰返し読取り時のばらつきの変化

測定回数	変動係数	最大値/最小値
1回測定	0.065	1.18
2回測定(平均)	0.054	1.21
3回測定(平均)	0.041	1.13
4回測定(平均)	0.037	1.14
5回測定(平均)	0.036	1.13

Table 3.2 読取り値のばらつき

シリアル番号	照射前 [counts]	照射後 [counts]	正味値 [counts]
① DN09126626T	46 ± 5	1952 ± 95	1906 ± 95
② DN09126627R	38 ± 13	2036 ± 48	1998 ± 50
③ DN09131438V	49 ± 11	2034 ± 31	1985 ± 33
④ DN091313733	56 ± 19	1773 ± 60	1717 ± 63
⑤ DN09127189Q	50 ± 8	2859 ± 5	1809 ± 10
⑥ DN09128926L	48 ± 13	1968 ± 93	1920 ± 94
⑦ DN091360239	42 ± 6	1822 ± 22	1779 ± 23
⑧ DN09126680Z	37 ± 4	1812 ± 31	1775 ± 32
⑨ DN091331347	53 ± 18	1900 ± 60	1847 ± 63
⑩ DN091315060	40 ± 2	1883 ± 42	1844 ± 42
		最大値	1998 [counts]
		最小値	1717 [counts]
		平均	1858 [counts]
		標準偏差	93 [counts]
		最大値/最小値	1.2
		変動係数(S_{μ})	0.05

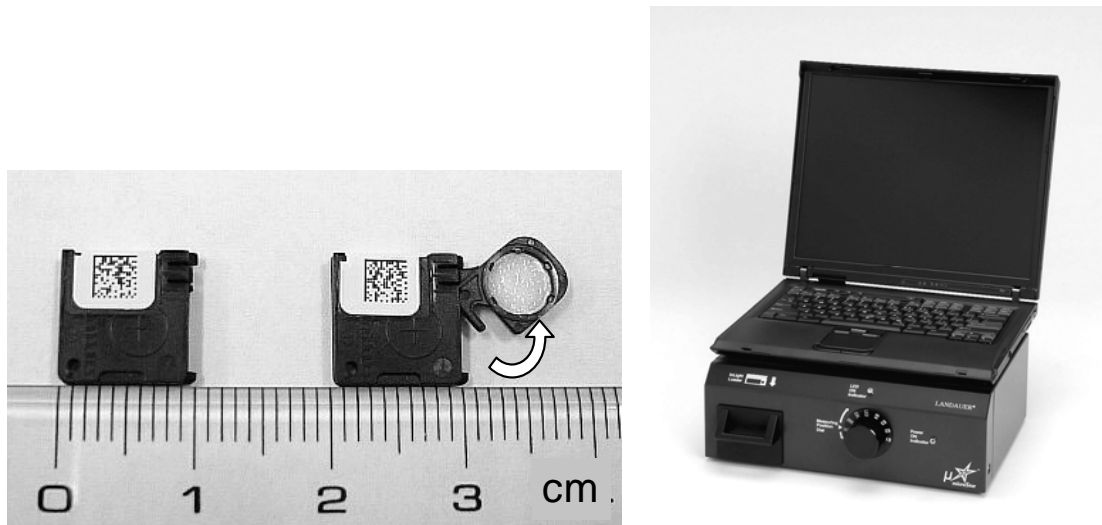


Fig 1.1 nanoDot (左) 及び microStar(右)の外観

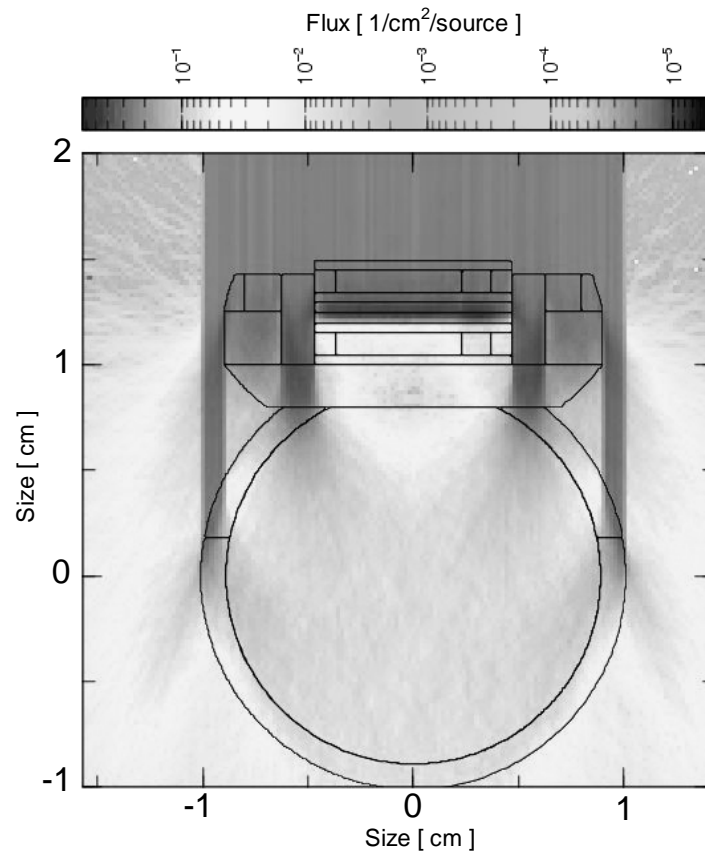


Fig 2.1 シミュレーションによる放射線照射に関する体系の描画例

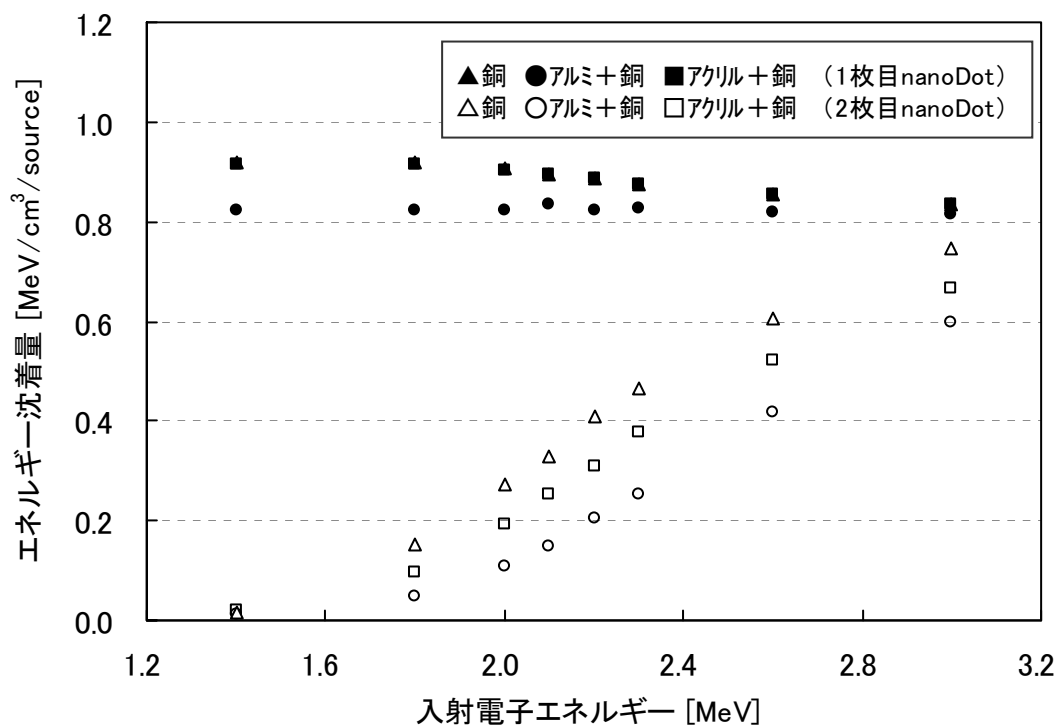


Fig 2.2 シミュレーションによる単色電子のエネルギー沈着量

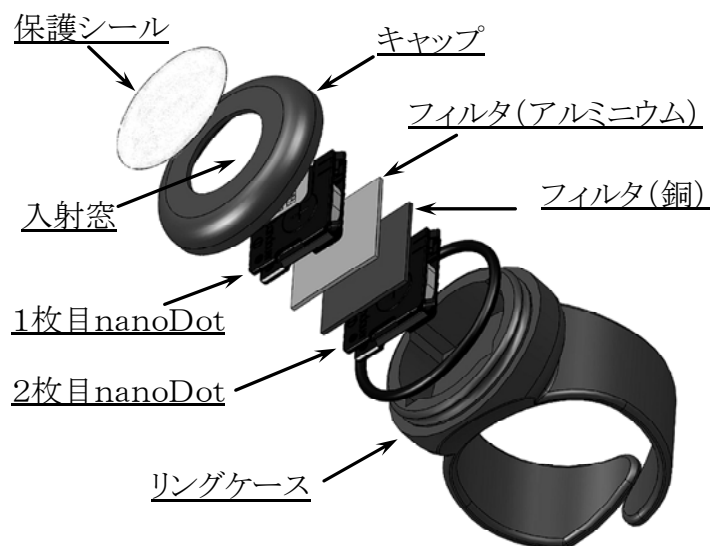


Fig 2.3 リングバッジの構成

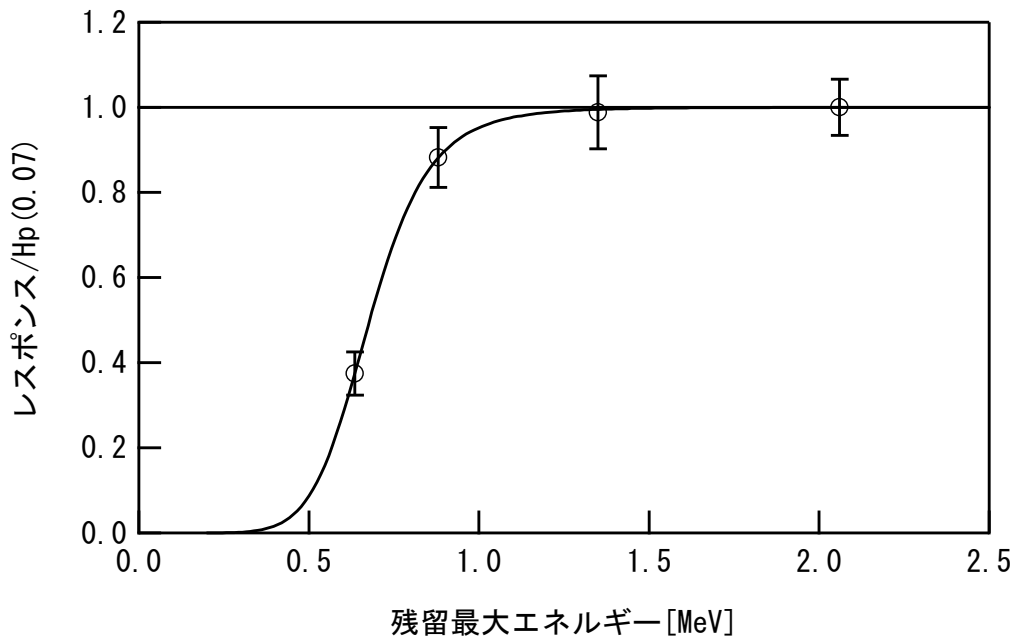


Fig 3.1 β 線に対するエネルギー特性

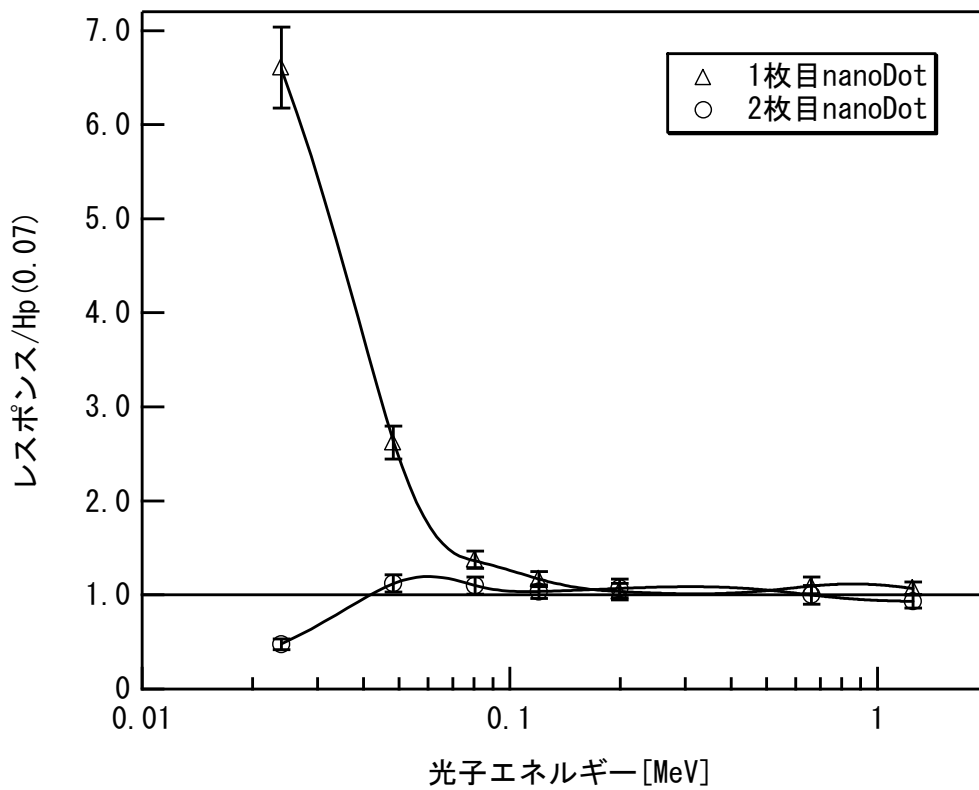


Fig 3.2 光子に対するエネルギー特性

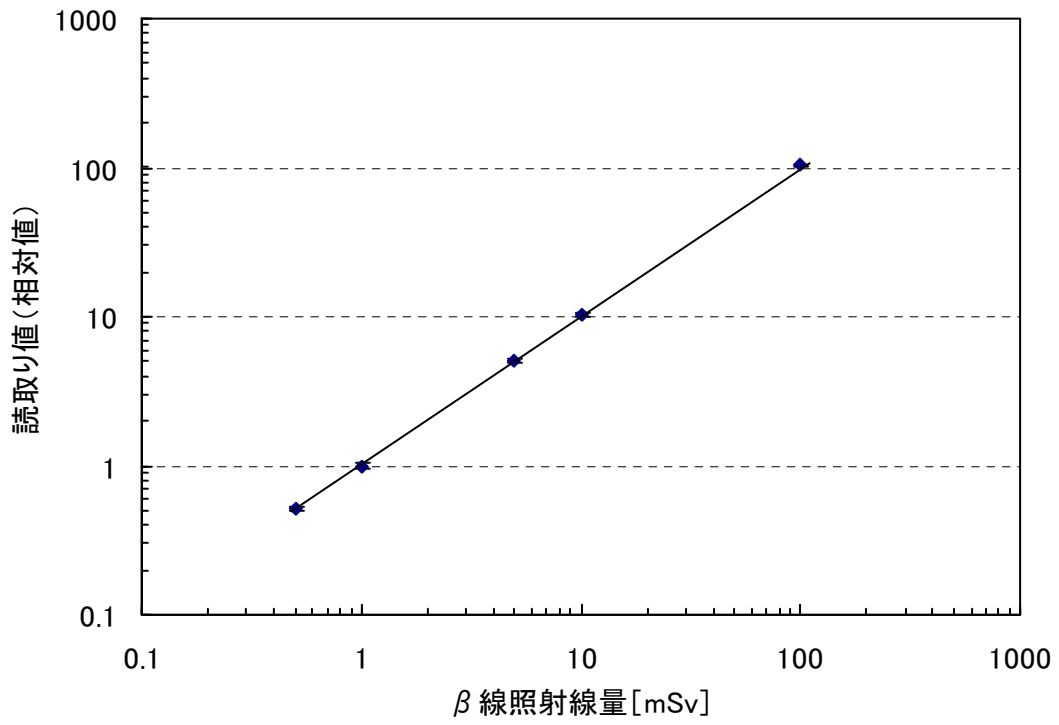


Fig 3.3 β 線に対する線量直線性

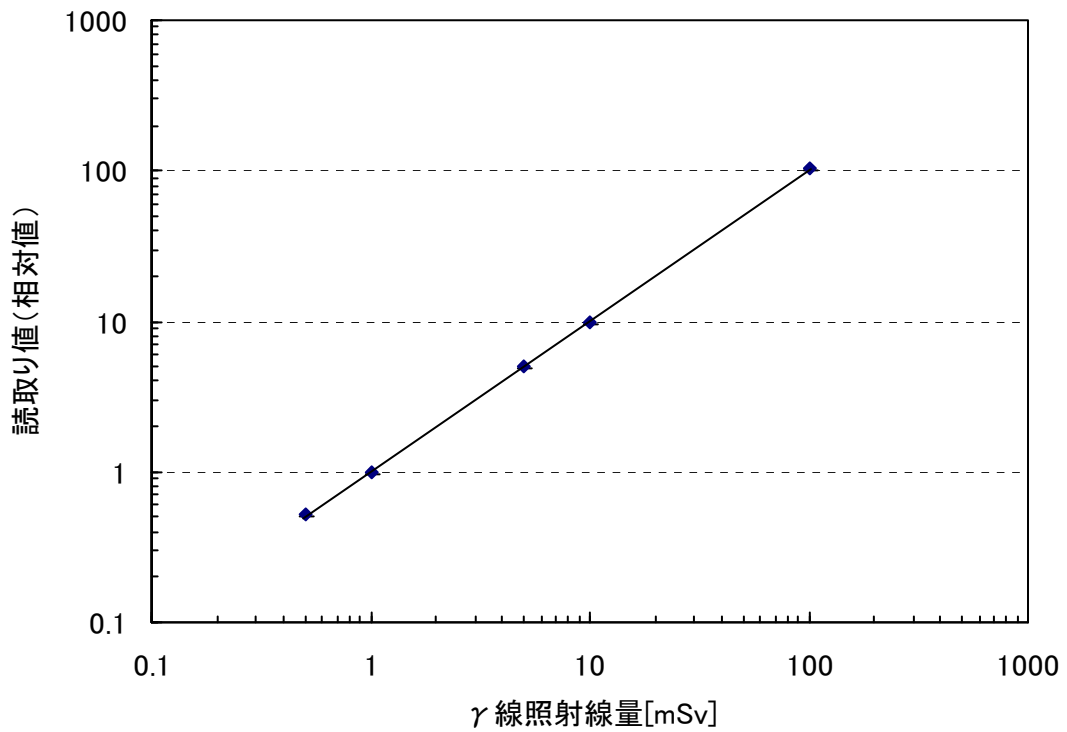


Fig 3.4 γ 線に対する線量直線性

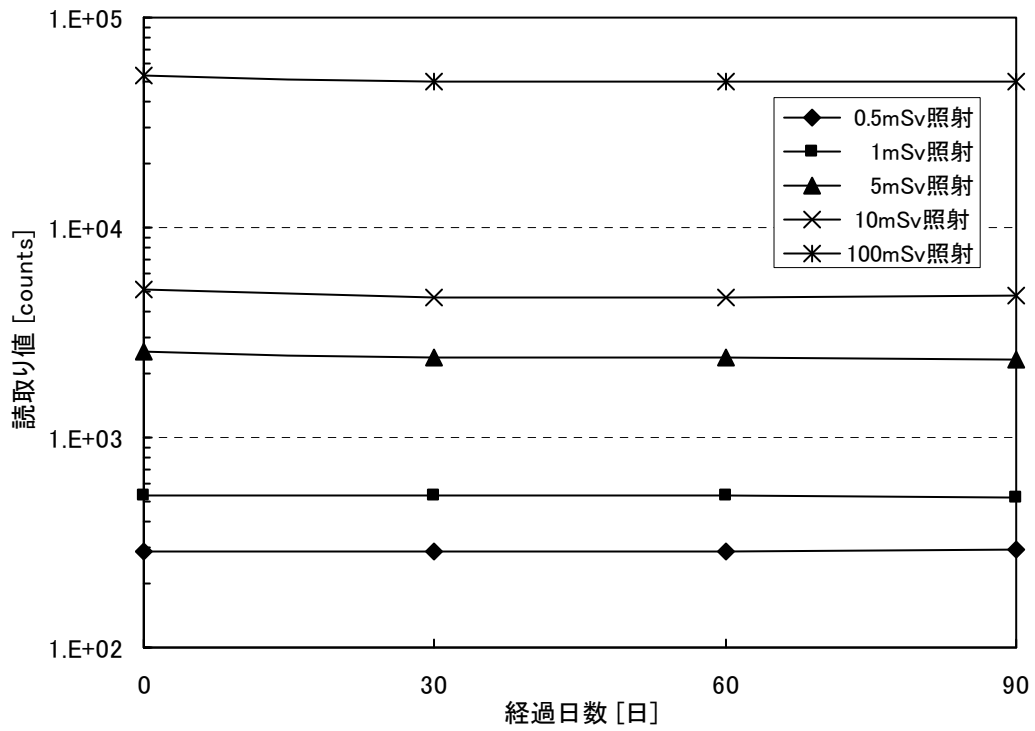


Fig 3.5 経時変化

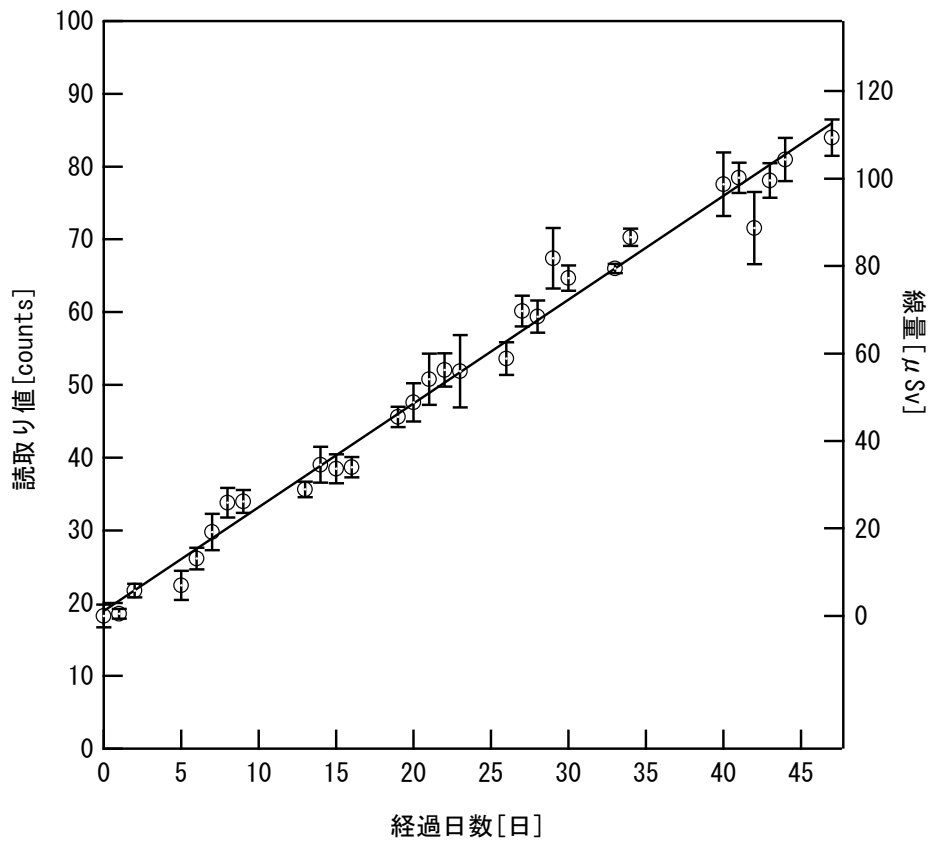


Fig 3.6 バックグラウンド値の変化

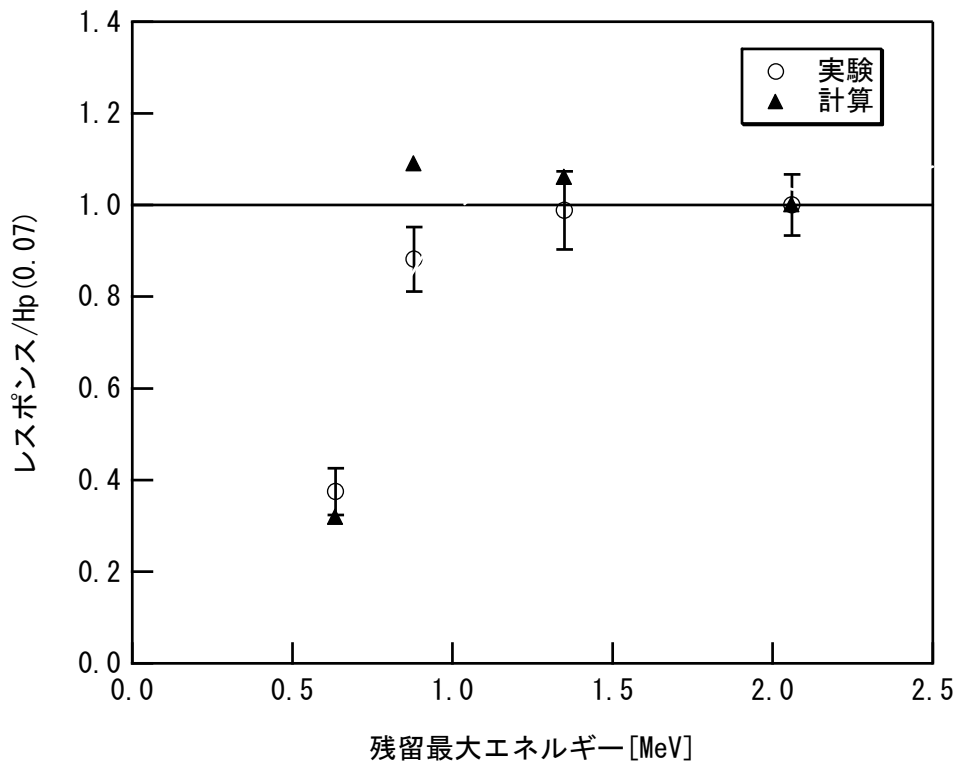


Fig 4.1 シミュレーションによるβ線エネルギー特性

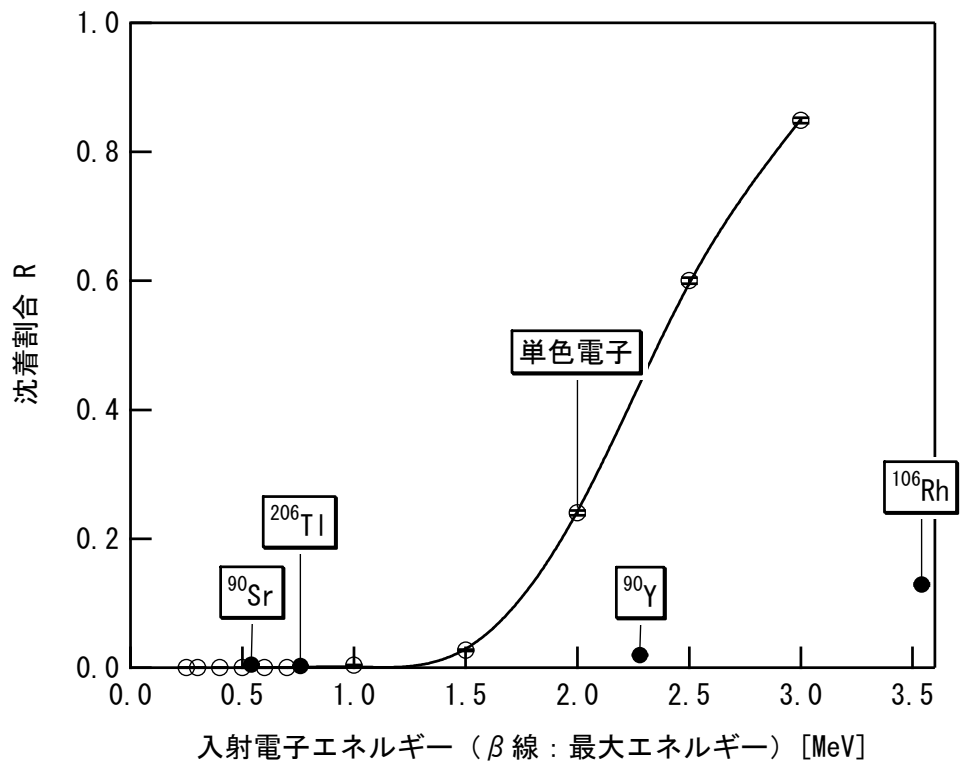


Fig 4.2 真空中で電子を入射した場合の沈着割合 R

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位		記号
	名称	SI基本単位	
面積	平方メートル	m ²	m ²
体積	立方メートル	m ³	m ³
速さ	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹	m ⁻¹
密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²	kg/m ²
比	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル	mol/m ³	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	lm/m ²
放射線当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² cd
酸素活性化	カタール	kat	J/mol	s ⁻¹

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報を省くために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で「radioactivity」と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
放射線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	yocto	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	SI単位による値	
	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エール	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガラ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 fエール≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

