



JAEA-Research

2024-016

DOI:10.11484/jaea-research-2024-016

OSL 線量計の環境モニタリングへの適用に向けた 特性改善と性能評価

Development and Performance Test of the OSL Dosimetry System
for Environmental Monitoring

吉富 寛 二川 和郎

Hiroshi YOSHITOMI and Kazuo FUTAGAWA

原子力科学研究所
放射線管理部

Department of Radiation Protection
Nuclear Science Research Institute

February 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは国立研究開発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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

OSL 線量計の環境モニタリングへの適用に向けた特性改善と性能評価

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所

放射線管理部

吉富 寛, 二川 和郎

(2024 年 11 月 11 日受理)

原子力施設周辺の環境モニタリングにおいては、熱ルミネセンス線量計や蛍光ガラス線量計といった受動形線量計を用いた積算線量計測も行われている。受動形線量計の一種である光刺激ルミネセンス (OSL) 線量計は、個人線量モニタリング用途として広く利用され、信頼性の高い測定が行われているものの、環境モニタリング用線量計としては活用されていない。OSL 線量計を環境モニタリングに転用できれば、リーダや線量計といった既存の資源を活用することで、安価で信頼性の高い積算線量計測が実施できる可能性がある。

酸化アルミニウム ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$) を用いた OSL 線量計の環境モニタリングへの適用に際しての課題としては、①OSL 線量計の信号量から空気吸収線量を評価するための線量評価アルゴリズムが整備されていないこと、②環境モニタリング用積算線量計測装置が有すべき性能が規定されている JIS Z 4346:2017 への適合性が評価されていないこと、が挙げられる。そこで、本研究では、モンテカルロ計算により線量評価アルゴリズムを開発するとともに、開発した線量評価アルゴリズムを用いて JIS Z 4346:2017 に基づく試験を実施し、適合性を評価した。その結果、OSL 線量計測装置は JIS Z 4346:2017 で規定される性能を有することが確認できた。有効測定範囲は 0.1 mGy~1 Gy, 定格エネルギー範囲は 30 keV~1.25 MeV, 定格入射角度範囲は $0^\circ\sim\pm 60^\circ$, 定格温度範囲は $-20^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$, 定格湿度範囲は 10%~90%である。

これらは JIS Z 4346:2017 で規定される最小定格範囲を満たしており、開発した OSL 線量計を用いた線量評価システムを用いた線量計測装置は、環境モニタリングに必要な性能を十分に有していることを確認することができた。

Development and Performance Test of the OSL Dosimetry System for Environmental Monitoring

Hiroshi YOSHITOMI and Kazuo FUTAGAWA

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

(Received November 11, 2024)

In environmental radiation monitoring around nuclear facilities, dose measurements have been implemented by passive dosimetry systems using thermoluminescence dosimeters or radiophotoluminescence dosimeters. Optically stimulated luminescence (OSL) dosimeter, hereinafter called OSLD, is one of the commonly used passive dosimeter for personal dose monitoring and provides highly reliable measurements. However, it has not been utilized for environmental dose monitoring purposes. The OSLD will be a promising dosimeter, which make it possible to conduct cost-effective and reliable environmental dose measurements by utilizing existing resources, such as readers and dosimeters.

When considering the application of the OSLD using aluminum oxide (α -Al₂O₃:C) for environmental dose monitoring, the following problems should be solved: (1) the lack of a dose calculation algorithm to evaluate air-absorbed dose from OSL signals, and (2) the conformity with JIS Z 4346:2017, which specifies the required performance of passive dosimeters for environmental monitoring, has not been evaluated. Therefore, in this study, a dose calculation algorithm was developed using Monte Carlo simulations, and tests based on JIS Z 4346:2017 were conducted.

As a result, it was confirmed that the OSLD meets the performance criteria mentioned in JIS Z 4346:2017. The effective measurement range is from 0.1 mGy to 1 Gy, the range of energy and angle of incidence are from 30 keV to 1.25 MeV and from 0° to ±60°, the temperature and humidity range are from -20°C to 40°C and from 10% to 90%, which are adequate for environmental dose monitoring.

Keywords: OSL Dosimeter, Environmental Monitoring, Testing, JIS Z 4346, Dose Calculation Algorithm

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 OSL 線量計及びリーダー	2
2.2 放射線標準施設棟 (FRS)	3
2.3 線量評価アルゴリズムの開発	3
2.3.1 モンテカルロ計算	3
2.3.2 線量評価アルゴリズム	4
2.4 受動形環境モニタリング用線量計測装置の JIS 試験	4
2.4.1 JIS Z 4345 との比較	4
2.4.2 試験項目	4
2.4.3 試験方法	5
3. 結果及び考察	7
3.1 線量評価アルゴリズム	7
3.2 変動係数及び直線性	9
3.3 エネルギー・方向特性	10
3.4 混合照射特性	10
3.5 線量計の温度特性	10
3.6 リーダの安定性	10
4. 結論	11
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction1

2. Material and methods2

 2.1 OSL dosimeter and reader2

 2.2 Facility of Radiation Standards (FRS)3

 2.3 Development of dose calculation algorithm3

 2.3.1 Monte Carlo simulations3

 2.3.2 Dose calculation algorithm4

 2.4 Performance test based on Japanese Industrial Standards for passive integrating dosimetry systems for environmental monitoring4

 2.4.1 Comparison with JIS Z 43454

 2.4.2 Performance test4

 2.4.3 Method of test5

3. Results and discussions7

 3.1 Dose calculation algorithm7

 3.2 Coefficient of variation, linearity9

 3.3 Energy and angle of incidence10

 3.4 Mixed radiations10

 3.5 Ambient temperature and relative humidity10

 3.6 Reader stability10

4. Conclusions11

Acknowledgements12

References12

表リスト

Table 1	JIS Z 4345 と JIS Z 4346 で異なる試験項目の比較	14
Table 2	温度特性試験における環境条件	14
Table 3	変動係数の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価	14
Table 4	直線性の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価	15
Table 5	N-40, N-60 及び N-80;90° の S-Cs;0° に対する相対レスポンス	15
Table 6	エネルギー特性の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価	15
Table 7	方向特性の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価	16
Table 8	混合照射における評価レスポンスの例	16

図リスト

Fig. 1	本研究で用いた OSL 線量計 (InLight 線量計)	17
Fig. 2	放射線標準施設棟の照射設備	17
Fig. 3	シミュレーション計算体系	17
Fig. 4	各素子の入射角度 0° に対するエネルギー応答特性 (計算と実測の比較)	18
Fig. 5	各素子の入射角度 up60° に対するエネルギー応答特性 (計算と実測の比較)	18
Fig. 6	各素子の入射角度 down60° に対するエネルギー応答特性 (計算と実測の比較)	19
Fig. 7	各素子の入射角度水平 60° に対するエネルギー応答特性 (計算と実測の比較)	19
Fig. 8	線量計の基準点及び基準の向き, 入射角度	20
Fig. 9	X線照射設備を使用したエネルギー・方向特性試験の様子	20
Fig. 10	線量計の温度特性試験の様子	21
Fig. 11	計算評価した単色光子入射 (入射角度 0°) に対する各素子のレスポンス	21
Fig. 12	計算評価した 30 keV 及び 662 keV 光子に対する各素子の応答の方向特性	22
Fig. 13	0° 入射に対する $R_2=S_2/S_4$ と入射光子エネルギーの関係性	22
Fig. 14	0° 入射に対する素子の信号の平均 \bar{S} のエネルギー依存性	23
Fig. 15	作成した線量評価アルゴリズム	24
Fig. 16	複数回読み取りに伴う信号量損失割合	25
Fig. 17	線量直線性	25
Fig. 18	エネルギー特性	26
Fig. 19	混合照射条件 (61,074 通り) におけるレスポンスの分布	26

This is a blank page.

1. はじめに

原子力施設周辺における環境放射線のモニタリングはモニタリングポスト等での空気吸収線量率の監視のほか、固定地点での積算線量計測も行われている。積算線量の測定機器としては、原子力規制庁の原子力災害対策指針補足参考資料¹⁾において熱ルミネセンス線量計、蛍光ガラス線量計、電子式積算線量計が例示されており、特に前二者については、国が定めた「放射能測定法シリーズ」^{2),3)}においてもこれらを用いたモニタリング方法が記載されており、広く環境モニタリングに使用されている。一方で同資料¹⁾においては、「新しい技術を取り入れた測定機器を採用していくことも重要であり、日本産業規格（JIS）又は国際電気標準会議（IEC）規格に準拠している測定機器がある場合には当該機器を採用していくことが望ましい」とも記載されている。

熱ルミネセンス線量計や蛍光ガラス線量計や電子式線量計などの積算線量計は、個人の外部被ばく線量を測定する個人線量モニタリングの用途としても広く利用されている。個人線量モニタリング用の放射線測定器としては、これらの線量計に加えて、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が開発・実用化されている^{4),5)}。特に、炭素をドープした酸化アルミニウム（ α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ ）を用いた OSL 線量計は国内でも広く使用されており、例えば日本原子力研究開発機構原子力科学研究所（以下「原科研」という。）においても、個人線量計として採用され、信頼性の高い測定が行われてきた⁶⁾。

このように、OSL 線量計は個人線量モニタリング（以下「個人モニタリング」という。）で多数の実績があり、安価で安定的に線量を測定できることから環境モニタリングにおける積算線量の測定においても有望な線量計であると考えられる。さらに、原科研のように個人線量計として用いられてきた場合、新たに整備することなく線量計やリーダ等の資源を環境モニタリングに有効活用できるというメリットもある。これまで、個人モニタリング用の OSL 線量計を環境モニタリングに適用するという試みはなされた^{7),8)}ものの、何れも実際の環境中での応答調査にとどまっており、関係する JIS 又は IEC 規格に準拠しているかについては課題として残されたままである。個人線量計と違い、環境モニタリング用線量計は人体による散乱がない自由空間での使用となること、測定量も線量当量ではなく空気カーマや空気吸収線量であること、放射線の入射方向も一般的に前方のみではないこと、設置される状況によっては過酷な温度環境に晒される可能性があることなどの特徴があり、求められる特性も異なる。OSL 線量計については、測定機器の要求事項などを規定した「放射能測定法シリーズ」は策定されていないが、JIS Z 4346:2017「X・ γ 線用受動形環境モニタリング用線量計測装置」⁹⁾に OSL 線量計を含む環境モニタリング用積算線量計が有すべき性能が規定されている。

OSL 線量計の検出素子として用いられる α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ は実効原子番号が生体組織や空気と比較して大きいために、低エネルギー光子に対しては過大応答する。そのため、個人線量計においては、複数の素子に材質や厚さの異なるフィルタを組み合わせ、これらの素子からの信号を演算（以下「線量評価アルゴリズム」という。）して、エネルギー特性を改善している。しかしながら、現状の線量アルゴリズムは個人線量の測定に最適化されているため、測定量などが異

なる環境モニタリングに適用できるとは限らない。

本研究では、個人線量モニタリング用の OSL 線量計を環境モニタリングに適用するために必要な線量評価アルゴリズムを開発し、作成した線量アルゴリズムを用いて JIS Z 4346:2017 への適合性を評価することを目的とする。

2. 試験方法

2.1 OSL 線量計及びリーダー

本研究では、 α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ を検出素子に持つ OSL 線量計 (Landauer 社製 InLight® Model 2, 以下「InLight 線量計」という。) を用いた。この線量計は体幹部の個人線量モニタリング用として開発されたもので、複数の OSL 素子が埋め込まれたスライドと、エネルギー補償用フィルタを備え遮光性を担保する線量計ケースから構成される。個人線量計の場合は、この線量計ケースをさらに人体に装着するためのクリップ等がついたバッジフォルダに入れて使用されるが、環境モニタリングにおいては必要ないため、本研究ではバッジフォルダは使用しなかった。

OSL 素子は、 α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ 粉末をポリエステルと混合してポリスチレンフィルム上にコーティングしたものをポリエステル層で挟んだ、直径 7.5 mm、厚さ 0.3 mm の円盤形状をしている。これらの素子 4 つがプラスチックスライド上に一列に並べられており、4 つの素子 (本報告書では、 $E_1 \sim E_4$ と呼称する) がそれぞれケースのオープンウィンドウ (OW)、プラスチックフィルタ (PL)、アルミニウムフィルタ (Al)、銅フィルタ (Cu) で挟まれる位置となるようケースにセットされる (Fig.1)。オープンウィンドウは光子のみならず β 線も透過できる一方、プラスチックフィルタは透過力の弱い β 線は透過できない。そのため、 E_1 及び E_2 は β 線の検出に利用される。銅フィルタ及びアルミニウムフィルタはともに素子に到達する光子を減少させるが、銅は原子番号が大きいため低エネルギーの光子に対する遮蔽能力が大きい。従って、 E_3 及び E_4 は光子の検出とエネルギー弁別に利用される。一方で、各素子が近接して配置されているために、斜め方向から大きな角度 (素子平面に対して平行に近い角度) で放射線が入射した場合は、一部の放射線が所定のフィルタを透過せずに OSL 素子に到達することにより弁別性能が悪化する可能性が想定される。例えば、 E_4 側から斜めに入射した場合、 E_2 には本来のプラスチックフィルタではなくアルミニウムフィルタを透過した光子が到達することになり 0° 入射に対する E_3 のようなふるまいをし、 E_4 についてはその外側にフィルタがないためにフィルタを透過しない光子が一部入射して 0° 入射に対する E_2 に近いふるまいをすることが予想される。環境モニタリングにおいては、多方向からの放射線の入射が想定されるため、こうした方向特性には留意する必要がある。

試験に用いる InLight 線量計はアニーラー (ARIOTECHNO 製 InLight®A50S Annealer) でアニーリングし、リーダー (Panasonic 製 ZPA-700A) で初期値 (線量計 j に対して、 $P_{j,i}(\text{counts}) : i = 1 \sim 4$ はそれぞれ、素子 $E_1 \sim E_4$ のカウント) を読み取った。照射後にも同様の方法で読み取りを行い、各素子からの信号値 (線量計 j に対して、 $A_{j,i}(\text{counts}) : i = 1 \sim 4$) を得た。線量計 j について、正味信号値 $S_{j,i}$ は(1)式により求めた。読み取りは後述するとおり、変動係数試験に

おける 0.1 mGy から 8 mGy の範囲で照射した線量計のみ 5 回連続して読み取ったが、それ以外では読み取り回数は 1 回とした。

$$S_{j,i} = \frac{A_{j,i} - P_{j,i}}{F_j} - \bar{S}_{b,i} \quad (1)$$

ここで、 F_j は製造メーカーにより線量計毎に与えられている感度であり、0.84~0.92 の範囲である。 $\bar{S}_{b,i}$ は、バックグラウンド放射線による影響を差し引くため、同時に読み取りを行った未照射の線量計（コントロール線量計）の信号値（コントロール線量計 k に対して、 $A_{k,i}^b(\text{counts}) : i = 1 \sim 4$) 及びその初期値（線量計 k に対して、 $P_{k,i}^b(\text{counts}) : i = 1 \sim 4$) から(2)式を用いて評価した。

$$\bar{S}_{b,i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(\frac{A_{k,i}^b - P_{k,i}^b}{F_k} \right) \quad (2)$$

m は、コントロール線量計の個数で 8 個以上使用した。

2.2 放射線標準施設棟（FRS）

照射試験は、全て原科研の放射線標準施設棟（Facility of Radiation Standards : FRS）の標準場を利用した。FRS は 2024 年 4 月 1 日現在国内唯一の産業標準化法に基づく放射線測定器の JIS 登録試験所であり、光子、 β 線及び中性子について、幅広いエネルギー範囲で国家標準である産業技術総合研究所とのトレーサビリティを確保して放射線測定器の校正や試験を実施できる施設である¹⁰⁾ (Fig.2 参照)。

本研究では、このうち、 γ 線標準場と X 線標準場を使用した。¹³⁷Cs 及び ⁶⁰Co 線源を利用した γ 線標準場（JIS Z 4511:2024¹¹⁾の記載に従い、それぞれ S-Cs、S-Co と表記する）については、開口角 30° のコリメータ付きの照射装置を用いたものである。X 線標準場については、FRS に設置されている中硬 X 線発生装置（最大管電圧 300 kV、最大管電流 30 mA）を用いた JIS Z 4511:2024¹¹⁾に規定される N シリーズの線質の場を利用した。

2.3 線量評価アルゴリズムの開発

2.3.1 モンテカルロ計算

線量評価アルゴリズムの開発においては、シンプルな体系で入射する光子のエネルギーや方向を変化させた系統的な線量計の応答解析が必要であり、モンテカルロシミュレーションはこうした応答計算には強力なツールとなる。そこで、本試験に用いた InLight 線量計を詳細にモデル化し、モンテカルロシミュレーションによる応答解析を行った。計算コードは PHITS 3.10¹²⁾の EGS モードを使用した。また、作成した体系を Fig.3 に示す。計算においては、光子は 1 keV まで、電子については断りのない限り 10 keV まで追跡した。計算の妥当性評価は、本線量計の性能評価に必要な 30 keV から 1.25 MeV までの 9 つの線質について計算した線量計各素子の応答を、実測データと比較することにより行った。ここで、入射光子のエネルギーに関しては、N-40 から N-300 までの X 線の線質は、Ankerhold¹³⁾による標準スペクトルを、S-Cs 及び S-Co についてはそれぞれ 662 keV 及び 1.25 MeV の単色光子とし、実測で電子平衡を成立させるために使用したビルドアップ板も模擬して計算に組み込んだ。Fig.4~7 に計算値

と実測値を比較したが、両者はよく一致しており、計算の妥当性が確認できた。

2.3.2 線量評価アルゴリズム

線量評価アルゴリズムは、2.1 で示した線量計 j の各素子 i からの正味信号量 $S_{j,i}$ (counts)を入力値として、空気カーマ $G_j = F(S_{j,i})$ (mGy)を出力値として得るプログラムとして作成した。作成においては、2.3.1 で妥当性を評価したシミュレーション計算により得られた各素子の空気カーマに対する応答を利用した。

2.4 受動形環境モニタリング用線量計測装置の JIS 試験

2.4.1 JIS Z 4345 との比較

JIS Z 4345:2017¹⁴⁾は、受動形個人線量計測装置に関する JIS 規格であり、エネルギー・方向特性、線量計の温度・湿度特性や光に対する線量計の安定性など 15 項目について OSL 線量計などの個人線量計が有すべき性能及びその試験方法が規定されている。一方で、前述のとおり、受動形環境モニタリング用線量計測装置が有すべき性能については、JIS Z 4346:2017 に規定されており、その試験項目は JIS Z 4345:2017 と全て同一である。

JIS Z 4346:2017 に示される 15 項目の試験のうち、「オーバーロード特性、残線量及び再使用」、「光に対する線量計の安定性」、「環境温度に対するリーダの安定性」、「光に対するリーダの安定性」、「供給電源に対するリーダの安定性」、「電磁両立性」及び「耐衝撃性」については、JIS Z 4345:2017 と比較すると、試験方法において $H_p(10)$ 等の線量当量であるところが、空気カーマ又は空気吸収線量と読み替わっているだけである。これらの試験項目については、測定量の違いは試験結果に影響を与えるものではないため、JIS Z 4345:2017 を満たしていれば同時に JIS Z 4346:2017 を満たす。

一方で、Table 1 に示す項目については試験方法が異なり、その違いが特性に影響を及ぼす、あるいは許容範囲が異なる。従って、受動形個人線量計測装置として JIS Z 4345:2017 の同項目を満たしていても、受動形環境モニタリング用計測装置として JIS Z 4346:2017 を満たすかどうかは分からない。

2.4.2 試験項目

InLight 線量計については、個人線量計として JIS Z 4345 の国際対応規格である IEC 62387¹⁵⁾を満たしている¹⁶⁾。従って、Table 1 に示す各項目の性能について評価すれば、JIS Z 4346 の全ての項目に対する受動形環境モニタリング用計測装置としての特性が明らかになるといえる。このうち、鈴木ら⁶⁾の報告では、「経時変化特性」については測定時間 3 ヶ月に対する試験がされており、許容範囲内の特性を有することが明らかにされている。

これらのことから、本研究においては「変動係数・直線性」、「エネルギー・方向特性」、「混合照射特性」、「線量計の温度・湿度特性」及び「リーダの安定性」にかかる試験項目を実施した。

2.4.3 試験方法

全ての照射試験は自由空間中で実施し、照射した光子の測定量は空気カーマである。ただし、校正場における試験では荷電粒子平衡が成立した状態で実施していること、空気の場合 1 MeV 以下の光子で制動放射により失われる二次電子のエネルギー割合である g 値は 0 であることから、空気吸収線量と空気カーマは等しい。照射方法については JIS Z 4346 及び JIS Z 4511 に準拠して行った。特に、S-Cs 場及び S-Co 場においては、JIS Z 4511 に定めるビルドアップ板を線量計の前面に設置した状態で照射した。試験は断りのない限り、JIS Z 4346:2017 の表 2 に示される標準試験条件の範囲内で実施した。

線量計の基準点及び基準の向き、方向特性試験における放射線の入射角度については Fig.8 に示したとおりである。不確かさについては、JIS Z 4346:2017 の附属書 A に準じて評価した。

2.4.3.1 変動係数、直線性試験

試験は JIS Z 4346:2017 の 7.1 節に従って実施した。線質は何れの場合も S-Cs であり、変動係数試験については、それぞれ空気カーマで 0.1 mGy, 0.2 mGy, 0.4 mGy, 0.8 mGy, 2.0 mGy, 3.0 mGy, 4.0 mGy, 8.0 mGy, 20 mGy 照射し、指示値の平均値 (\bar{G}) 及び標準偏差 (s) から変動係数 (v) を(3)式に従って求めた。0.1 mGy 未満及び 20 mGy を超える線量については、その許容範囲は Table 1 に示されるように、Sv と Gy の単位の違いを除いては JIS Z 4345:2017 と同じであるため、試験を省略した。

$$v = \frac{s}{\bar{G}} \times 100(\%) = \frac{1}{\bar{G}} \cdot \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (G_j - \bar{G})^2 \times 100(\%) \quad (3)$$

ここで、 $n = 8$ は、試験に使用した線量計の個数である。

直線性試験については、変動係数試験で得た 3.0 mGy 照射した指示値の平均値 ($\bar{G}_{r,0}$) を基準条件とし、0.1 mGy から 20 mGy の指示値との比 $\bar{G}/\bar{G}_{r,0}$ を求め、その拡張不確かさ¹ U_{com} を算出した。直線性試験においても 0.1 mGy 未満及び 20 mGy を超える線量については、その許容範囲は Table 1 に示されるように、Sv と Gy の単位の違いを除いては JIS Z 4345:2017 と同じであるため、試験を省略した。照射した線量の取り決め真値を C (基準条件においては $C_{r,0}$ (= 3.0 mGy)) として、 $C/C_{r,0}$ 及びその拡張不確かさ $U_{\text{c,com}}$ から JIS Z 4346:2017 に従って許容範囲の判定を(4)式により行った。

$$r_{\min} - U_{\text{c,com}} \leq \left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} \pm U_{\text{com}} \right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C} \leq r_{\max} + U_{\text{c,com}} \quad (4)$$

ただし、JIS Z 4346:2017 に従い、0.5 mGy 未満については $r_{\min} = 0.91$, $r_{\max} = 1.11$, 0.5 mGy 以上 20 mGy 以下については $r_{\min} = 0.95$, $r_{\max} = 1.05$ である。

2.4.3.2 エネルギー・方向特性試験

試験は JIS Z 4346:2017 の 7.3 節に従って実施した。照射した線質は、N-40 (33 keV), N-

¹ 拡張不確かさは、測定結果について約 95%の信頼の水準を持つと推定される区間を定めるものであり、正規分布においては、標準不確かさに包含係数 $k=2$ を乗じたものである。

60 (48 keV) , N-80 (65 keV) , N-100 (83 keV) , N-150 (118 keV) , N-200 (164 keV) , N-300 (250 keV) , S-Cs (662 keV) 及び S-Co (1250 keV) である。ただし、()内は平均エネルギーを示す。

入射角度については、 0° については全ての線質で試験し、N-40, N-60, N-80 については $+60^\circ$ (水平方向), $\pm 60^\circ$ (垂直方向), 90° について試験した (Fig.8 参照)。InLight 線量計は水平方向については、基準方向に対して対称である (非対称なプラスチックの部分はあるが、シミュレーション計算により線量計の応答に影響を与えないことを確認した。)と考えられるため、プラス方向のみの試験とし、また、素子の中心を通り基準方向に垂直な面に対して対称であるため、 90° を超える角度の照射は実施しなかった。なお、 90° の照射においては、線量計の向きを 45° ステップで変えた 8 方向から照射した。試験の一例を Fig.9 に示す。

各試験点について、線量計の指示値の平均値 \bar{G} と基準条件である S-Cs, 0° での指示値の平均値 $\bar{G}_{r,0}$ の比 $\bar{G}/\bar{G}_{r,0}$ を求め、その拡張不確かさ U_{com} を算出した。

2.4.3.3 混合照射特性試験

開発した線量評価アルゴリズムでは、指示値は複数の素子の信号を組み合わせ、場合分けを伴った非線形関数により評価するため、混合照射時の特性は自明とはいえない。JIS Z 4346:2017 では、エネルギー・方向特性を取得した 9 つ全ての線質に対して、 0° から 60° までの 15° ステップの全ての角度についての特性を取得することが求められている。各角度について up 方向, down 方向, 水平方向 (水平方向については、線量計の対称性よりプラスマイナスの何れか) の 3 種類行うことが必要であるので、 $9 \times (4 \times 3 + 1) = 117$ 個の特性を取得することが必要になる。一方で、IEC 62387:2020 では、実測との比較により計算の妥当性が検証されていれば、モンテカルロ計算によりこれらのレスポンスを求めてもよいと記載されている。

2.3.1 において、本線量計に対するモンテカルロ計算によるレスポンス評価の妥当性は検証されているため、2.4.3.2 で測定された線質及び角度以外については、モンテカルロ計算により各素子のレスポンス ($S_1 \sim S_4$) を評価した。

得られた $117 \times 4 = 468$ 個の各素子のレスポンスから、JIS Z 4346:2017 附属書 D に従って 1:9 から 9:1 まで 9 通りに混合比率を変化させながら混合照射した場合の各素子のレスポンスを算出し、開発した線量評価アルゴリズムを用いて線量計のレスポンス ($9 \times 117 C_2 = 61,074$ 通り) を評価した。

2.4.3.4 線量計の温度・湿度特性試験

Table 1 でも示したとおり、個人線量計とは異なり、環境モニタリング用線量計として用いる場合は、最小定格範囲の下限温度が -20°C まで要求される。従って、 -20°C に対する試験のみ実施した。S-Cs で 3 mGy 照射した 8 個ずつの 2 組の線量計について、第 1 グループは標準試験条件下で 48 時間保管、第 2 グループは恒温槽 (ヤマト科学製 IW223/243) を使用し、 -20°C で 48 時間保管した後、読み取りを行い、開発した線量評価アルゴリズムを用いてそれぞれのグループの指示値の平均値 \bar{G}_1 , \bar{G}_2 及び標準偏差 s_1 , s_2 を求め、拡張不確かさ U_{com} を JIS Z 4346:2017 附属書 A によって計算した。保管中の温度、湿度及び気圧については、気象計器 (テ

イアンドディ社製おんどとり TR-73U) を用いて連続監視した。試験の様子を Fig.10 に、それぞれの保管の環境条件を Table 2 に示す。JIS Z 4346:2017 への適合性は、(5)式に示される許容範囲に基づき判定した。

$$0.83 \leq \left(\frac{\bar{G}_2}{\bar{G}_1} \pm U_{\text{com}} \right) \leq 1.25 \quad (5)$$

2.4.3.5 リーダの安定性試験

JIS Z 4346:2017 に従って、各 8 個からなる以下の 3 組のグループの線量計を準備して照射し、読み取りを行った。

- ・第 1 グループ：試験開始時に S-Cs で 3 mGy 照射し 1 週間保管した後に指示値を読み取った。
- ・第 2 グループ：試験開始 1 ヶ月半後に S-Cs で 3 mGy 照射し、1 週間保管した後に指示値を読み取った。
- ・第 3 グループ：試験開始 3 ヶ月後に S-Cs で 3 mGy 照射し、1 週間保管した後に指示値を読み取った。

読み取り結果から、線量評価アルゴリズムを用いて、それぞれのグループの指示値の平均値 \bar{G}_i 及び標準偏差 s_i を求め、拡張不確かさ U_{com} を JIS Z 4346:2017 附属書 A によって計算した。JIS Z 4346:2017 への適合性は、(6)式に示される許容範囲に基づき判定した。

$$0.91 \leq \left(\frac{\bar{G}_i}{\bar{G}_1} \pm U_{\text{com}} \right) \leq 1.11 \quad (6)$$

3. 結果及び考察

3.1 線量評価アルゴリズム

入射光子のエネルギーを 10 keV から 3 MeV まで変化させたときの、空気カーマに対する各 OSL 素子の応答を計算したものを Fig.11 に示した。また、30 keV 光子及び 662 keV 光子についてその入射方向を 0° から 60° まで変化させたときの各 OSL 素子の応答を計算したものを Fig.12 に示した。これらの計算においては、周囲は真空中かつビルドアップ板を組み込んでいないため、電子平衡を仮定して電子は追跡せず、カーマ近似で行った。

各素子の応答のエネルギー依存性は大きく、また低エネルギー領域では方向依存性も大きい。そのため、線量評価アルゴリズムによりエネルギーや方向依存性が小さくなるよう線量評価する必要がある。Fig.11 に示されるように、E₁ 又は E₂ と E₄ のエネルギー応答は低エネルギー領域において顕著に異なっており、これらの比を利用することで低エネルギー領域での入射エネルギーを把握することができる。E₁ については β 線などの影響を受ける可能性があることを考慮してより安定的な E₂ を利用し、E₂ と E₄ の応答比 $R_2 = S_2/S_4$ を入射エネルギーの指標とした。一方、Fig.12 において次のとおり示されている E₃ と E₄ の低エネルギー光子に対する方向特性の顕著な相違から、E₃ と E₄ の応答比 $R_3 = S_3/S_4$ を入射方向性の指標とした。

- ・E₃ について、down 方向 30° を超えると、アルミニウムフィルタではなく遮蔽能力がより大

小さい隣の銅フィルタを通過し、線束が減衰した入射の割合が顕著になり、低エネルギーではレスポンスが減少する。

- ・ E_4 について、up 方向については銅フィルタでなく遮蔽能力がより小さい隣のアルミニウムフィルタを通過してくる放射線の入射の割合が、また、down 方向については銅フィルタを通過しない放射線の入射の割合が、それぞれ、角度の増大に従って多くなる。

これらの指標に基づき、4つの素子の平均 $\bar{S} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 S_i$ に対する補正を施すことにより線量を算出することとした。評価に平均値 \bar{S} を採用したのは、信号のばらつきを抑え環境モニタリングに必要な精度を確保するためである。

0° 入射に対する光子エネルギーと R_2 の関係を Fig.13 に、 0° 入射に対する \bar{S} のエネルギー依存性を Fig.14 に示した。これらの関係性を利用し、 R_2 から実効エネルギー E_{eff} を評価し、 E_{eff} から \bar{S} の低エネルギーでの過大応答を補正するアルゴリズムを作成した (Fig.15)。 R_2 が 1.1 より小さい場合は、 E_2 と E_4 の応答が同程度であることを示唆しており、低エネルギー光子の寄与がないと判断できるため、 \bar{S} はこの領域ではエネルギーによって変化しないので補正を行う必要がない。信号量が小さい場合は、信号のばらつきによって低エネルギー光子が入射していないにも関わらず R_2 が 1.1 以上となる可能性がある。 S_1 と S_2 はエネルギーによらず同程度の値となる (Fig.11 参照) ので、その比は信号のばらつきの指標となる。従って、信号のばらつきを超えているかどうかを、 R_2 を S_1 と S_2 の比と比べることにより判定した。また、線量計の down 方向から低エネルギー光子と 100 keV 以上の高エネルギー光子が同時に入射する場合には、前述したとおり銅フィルタを通過しない低エネルギー成分が E_4 に入射することによって、 E_4 が過大応答する (Fig.12 参照)。その結果、 E_1 , E_2 , E_4 が過大応答し、 E_2 と E_4 の応答比である R_2 が 1.1 より小さくなって低エネルギー光子の寄与はないと判断し、 \bar{S} をそのまま使用して線量評価するため過大に評価してしまう。 E_3 のみ良好な応答を示すため、 E_2 と E_3 の応答比 S_2/S_3 で \bar{S} を除することによりこの過大評価を低減することとした。なお、低エネルギー成分の寄与がない場合は、 S_2/S_3 は概ね 1 であるので、これ以外のケースの線量評価には影響を及ぼすことはない。

低エネルギー光子により R_2 が 1.1 以上となるケースにおいて、線量計の down 方向から光子が入射したときには、同様に一部の光子は銅フィルタを通過せずに直接 E_4 に入射するため、 E_4 が過大応答する (Fig.12 参照)。そのため、 R_3 を指標として R_3 が 0.9 より小さい場合は R_2 を用いた実効エネルギーの算出は適切でないから、 $R_2/R_3 = S_2/S_3$ を代わりに使用した。

また、10 keV 以上の光子の場合、Fig.12 でも明らかなおおり、 $R_1 = S_1/S_2$ は 1 に近い値である。そこで、信号のばらつきを考えて R_1 が 1.0 ± 0.3 から外れる場合は、 β 線などの影響がある異常値として判定することとした。Fig.15 中の c はカウント値(counts)を空気カーマ(mGy)に変換する換算係数であり、20 個の素子を S-Cs で 3 mGy 照射し、その平均値から算出した。本試験で使用したリーダを用いた場合、 $c = 4.392 \times 10^{-4}$ (mGy/count)であった。

なお、上述のとおり線量評価アルゴリズムは、入射方向 0° など特定の条件における特性を基にしているため、放射線の入射方向などの条件が変化しても、妥当な評価結果を与えるかは次項以降で示す照射試験により明らかにしておく必要がある。

3.2 変動係数及び直線性

信号のばらつきにより、特に有効測定範囲の下限に近い線量レベルでは線量評価アルゴリズムが実効エネルギーを誤判定してしまうことが一定の確率で起きるため、線量評価が安定しない。例えば、S-Cs (662 keV) で 0.2 mGy 照射した際の信号量は 440 counts 程度になるが、本来このエネルギーでは、全ての素子で同程度の信号量が観測されるはずである (Fig.11 参照)。しかしながら、信号のばらつきにより、 $(S_1, S_2, S_3, S_4)=(457 \text{ counts}, 451 \text{ counts}, 466 \text{ counts}, 397 \text{ counts})$ のように S_4 のみ小さくなるケースがある。この場合、 $R_2 = S_2/S_4 = 1.14 > 1.1$ かつ $\max(S_1, S_2)/\min(S_1, S_2) = 1.01 < R_2$ となり、実効エネルギー E_{eff} を 80 keV と判定するため、エネルギー補正により線量を過小に評価してしまう。このようなケースはモンテカルロ計算によると全体の 11%程度である。もちろん、信号量が大きい場合は、ばらつきが小さくなるため、そのようなケースが起こる確率は小さくなる。このように 1 個の線量計の 1 回読み取りによる情報では、80 keV の光子を照射されたときの信号情報と見分けがつかないため、線量評価の不安定性による指示値の変動は避けられない。

本研究で用いた InLight 線量計は、読み取りによって蓄積された放射線エネルギーの一部しか解放せず、繰り返し測定が可能である。そこで、こうした不安定性を回避し、線量評価値の精度を上げるために、複数回読み取りを行い平均化することとした。662 keV のエネルギーに対する 0.2 mGy 程度の線量において、5 回の読み取り結果の平均値を使用した場合、信号量のばらつきによって $R_2 \geq 1.1$ かつ $R_2 \geq \max(S_1, S_2)/\min(S_1, S_2)$ となる確率は 1%以下になると見積もられるため、5 回平均とすることとした。ただし、多数回の読み取り操作によって発光量損失がわずかに起こるために、その補正が必要となる。そこで、照射した 64 個の線量計を 5 回読み取り、その信号量の変化を調べた。Fig.16 に示すように、この範囲では、信号量 a_n の損失割合 $L_n = a_n/a_1$ は読み取り回数 n に対して直線的に減少しており、5 回目の読み取り時の信号量は、1 回目と比較して 3.3%減少していた。林ら¹⁷⁾によると、100 回読み取りの結果、その減少割合は 3 次関数で表され、1 回の読み取りあたりの信号量の損失割合は 0.7%と報告されている。本研究においては、損失割合は 1%程度であるが、読み取り装置などが異なること、少数回では直線的に近似できることを考えると概ね妥当である。

変動係数試験においては、上述の信号量の損失割合 L_n を用いて以下の式に示すように、それぞれの素子 $i = 1 \sim 4$ の信号量 $a_{i,n}$ を補正することにより平均の信号量 A_i を算出し、解析した。

$$A_i = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 a_{i,n} / L_n \quad (7)$$

ただし、信号量の大きい 20 mGy については 1 回のみ読み取りとした。

変動係数は Table 3 に示すとおり JIS Z 4346:2017 の許容範囲を満足していた。0.8 mGy から 20 mGy の範囲において、基準が 3%でないのは、JIS Z 4346:2017 の附属書 C で規定されている変動係数の許容範囲を変更する係数が乗じられているためである。なお、変動係数は残線量に依存すると考えられるが、本研究における初期値は 19~65 counts の範囲内であった。使用においては、50 counts 程度にまではアニール処理しておく必要がある。

直線性については、Fig.17 及び Table 4 に示すとおり、JIS Z 4346:2017 の許容範囲を満足していた。

3.3 エネルギー・方向特性

0° に対するレスポンスのエネルギー依存性を Fig.18 に、入射角度 90° について、S-Cs の 0° に対する相対レスポンスを Table 5 に示した。また、0° 及び 60° について JIS Z 4346:2017 に規定される許容範囲に対する適合性を評価した結果を Table 6 及び Table 7 に示した。エネルギー特性については、±20%以内であり良好な特性を有していた。また、方向特性についても JIS の基準を満足しており、線量評価アルゴリズムが十分に機能していた。90° については、入射光子はフィルタを通らずに各素子に入射することとなり、環境モニタリングにおいて起こり得る可能性は極めて小さいが、線量評価としては最も厳しいケースとなる。そのため、低エネルギーで過大応答し、その程度は 30 keV で 2.3 倍程度であった。

3.4 混合照射特性

Table 8 にレスポンスの一例を、Fig.19 にレスポンスの頻度分布を示した。61,074 個全てのレスポンスについて、JIS Z 4346:2017 の許容範囲である 0.50 から 1.67 を満足した。傾向としては、低エネルギー光子と高エネルギー光子が混在し、高エネルギー光子の割合が大きい場合に過小応答となる。これは実効エネルギーが低く評価される結果、レスポンスが小さくなるようエネルギー補正するためである。一方、60~100 keV あたりの光子が混在して down 方向から入射したときに過大評価となる。この場合には、高エネルギー光子と判定されるため、レスポンスのエネルギー補正がされないためである。現実的には、¹³⁷Cs などの場合では、その散乱線のエネルギー範囲は概ね 100 keV 程度であり、N-150 と S-Cs の混合照射のような条件となるが、そのレスポンスは良好である (Table 8)。

3.5 線量計の温度特性

3 mGy を照射し、標準試験条件の温度環境下及び-20°Cで保管した場合の指示値はそれぞれ 2.97 ± 0.15 mGy, 2.97 ± 0.07 mGy であった。これらから

$$\frac{\bar{G}_2}{\bar{G}_1} \pm U_{\text{com}} = 1.00 \pm 0.05$$

となり、-20°C環境でも影響はほとんどなく JIS Z 4346:2017 の許容範囲 (0.83~1.25) を満足していた。

3.6 リーダの安定性

試験開始 1 ヶ月半後の読み取りに対しては、

$$\frac{\bar{G}_2}{\bar{G}_1} \pm U_{\text{com}} = 1.00 \pm 0.04$$

であり、試験開始 3 ヶ月後の読み取りに対しては、

$$\frac{\bar{G}_3}{\bar{G}_1} \pm U_{\text{com}} = 0.99 \pm 0.04$$

であった。ともに JIS Z 4346:2017 の許容範囲 (0.91~1.11) を満足しており、測定時間 3 ヶ

月に対して必要となるリーダの安定性を有していることが確認できた。

4. 結論

InLight 線量計を環境モニタリングに適用するために、空気カーマ（空気吸収線量）を評価するアルゴリズムを開発した。開発した線量評価アルゴリズムを使用し、線量計とリーダからなる OSL 線量計測装置の性能を JIS Z 4346:2017 に従い評価した。その結果、以下の範囲で JIS Z 4346:2017 で規定される性能を有することが確認できた。

【有効測定範囲と定格範囲】

線量範囲：0.1 mGy～1 Gy

エネルギー範囲：30 keV～1.25 MeV

入射角度範囲：0° ～±60°

温度：-20℃～+40℃

相対湿度：10%～90%

測定時間：3 ヶ月間

環境γ線のモニタリングにおいて線量値への寄与は 3 MeV 以下が大部分であること、平常時においてモニタリング地点に 3 ヶ月程度配置した場合の線量値は概ね 100～400 μ Gy であること、晒される温度環境としては概ね-20～40℃であること³⁾を考慮すると、InLight 線量計を用いた線量評価システムは、環境モニタリングに必要な性能を十分に有しているといえる。

本研究結果を使用するうえでの注意点等を以下にまとめる。

- ・有効測定範囲の下限レベルの線量付近では 5 回読み取りを行い、発光損失を補正した平均信号値を基に線量評価する必要がある。
- ・アニール後の残線量が 50 counts 程度になるまでアニール処理する必要がある。
- ・本報告書で示した結果は、安定的に測定が可能な Panasonic 製 ZPA-700A を利用したものであるため、他のリーダとの組み合わせにおいては、変動係数が JIS の基準を満たしていることを確認することが望ましい。
- ・リーダ及び線量計には個体差があるため、3.1 で示した換算係数 c は予め標準照射により決定しておくことが望ましい。線量評価アルゴリズムにおける定数値については、この換算係数以外は本報告書の数値をそのまま利用できる。
- ・線量計の配置方法については、放射線の飛来方向が特定されている場合は、その方向と Fig.8 に示す基準の向きを一致させて設置することが推奨されるが、実環境条件でのフィールド試験結果も併せて検討すべきである。

実際に環境モニタリングにおける積算線量測定に運用するためには、これに加えて文献³⁾でも指摘されているとおり、種々の実環境条件のフィールド試験により妥当な評価が得られるこ

との確認，使用する線量計の健全性確認，測定装置の適切な維持管理が必要であろう。

謝 辞

青森研究開発センターの高橋 聖氏，原子力科学研究所放射線管理部の上野 有美氏及び稲野 辺 なおみ氏には，個人線量計の取扱いに関する助言と InLight 線量計及びリーダを借用させていただいたことに感謝申し上げたい。原子力科学研究所放射線管理部の川崎 将亜氏には，環境モニタリングに関する助言をいただいた。原子力科学研究所放射線管理部の西野 翔氏，辻智也氏，大堀 祥己氏，海野 和重氏及び FRS の関係諸氏には FRS の利用に関して調整いただいた。原子力科学研究所放射線管理部の阿部 琢也氏及び佐藤 玖莉氏には本研究の遂行に有益なご助言をいただいた。また，安全・核セキュリティ統括本部施設保安管理課には，放射線安全に係る技術開発会議を通じてプロジェクトの管理，本研究の遂行に必要な恒温槽の予算の補助をいただいた。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 原子力規制庁，平常時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料），2021.
- 2) 文部科学省，熱ルミネセンス線量計を用いた環境 γ 線量測定法，放射能測定法シリーズ18，1990.
- 3) 文部科学省，蛍光ガラス線量計を用いた環境 γ 線量測定法，放射能測定法シリーズ 27，2002.
- 4) C. A. Perks, G. Le Roy and B. Prugnaud, Introduction of the InLight monitoring service, Radiat. Prot. Dosim., vol. 125, no.1-4, 2007, pp.220-223.
- 5) M. Sommer, A. Jahn and J Henniger, A new personal dosimetry system for $H_p(10)$ and $H_p(0.07)$ photon dose based on OSL-dosimetry of beryllium oxide, Radiat. Meas., vol. 46, 2011, pp.1818-1821.
- 6) 鈴木 朗史，鈴木 武彦，高橋 聖，仲田 亨，村山 卓，角田 昌彦，外部被ばく個人線量測定用 OSL 線量計の諸特性，JAEA-Technology 2014-049, 2015, 19p.
- 7) 大倉 毅史，大石 哲也，宮内 英明，吉富 寛，橘 晴夫，東 大輔，鈴木 朗史，小林 育夫，OSL 線量計を用いた放射線管理；環境 γ 線モニタリングへの適用性，日本保健物理学会第44回研究発表会予稿集，2011.
- 8) 小林 育夫，関口 寛，龍田 文章，Mark Salasky，古賀 妙子，森嶋 彌重，OSL 個人線量計による環境放射線量の実測，日本放射線安全管理学会誌，vol. 3, no. 2, 2004, pp.73-78.
- 9) 日本産業規格，X・ γ 線用受動形環境モニタリング用線量計測装置，JIS Z 4346:2017, 2017.
- 10) 吉富 寛，原子力機構 FRS 標準場の現状と JIS 登録試験所について，FBnews, 557, 2023, pp.1-5.
- 11) 日本産業規格，X線及び γ 線用線量（率）測定器の校正方法，JIS Z 4511:2024, 2024.

- 12) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Hunter, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol., vol. 61, 2024, pp.127-135.
- 13) U. Ankerhold, Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data – ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra. PTB-Dos-34, 2000.
- 14) 日本産業規格, X・ γ 線及び β 線用受動形個人線量計測装置並びに環境線量計測装置, JIS Z 4345:2017, 2017.
- 15) International Electrotechnical Commission (IEC), Radiation protection instrumentation – Passive integrating systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation, IEC 62387-1, 2020.
- 16) Landauer, <https://www.landauer.com/product/oslr-reader-series> (accessed 2024-04-30) .
- 17) 林 裕晃, 中川 滉平, 沖野 啓樹, 竹上 和希, 岡崎 徹, 小林 育夫, OSL 線量計の繰り返し読み取りによる高精度測定, 医用画像情報学会雑誌, vol. 31, no. 2, 2014, pp.28-34.

Table 1 JIS Z 4345 と JIS Z 4346 で異なる試験項目の比較

項目		JIS Z 4345:2017 ^{*1}	JIS Z 4346:2017 ^{*2}
変動係数	変動係数の許容範囲 ^{*3}	A<0.1 mSv : 15%以下	A<0.1 mGy : 15%以下【同じ】
		0.1 mSv≤A<1.1 mSv : (16-A/0.1)%以下	0.1 mGy≤A<0.5 mGy : (18-3A/0.1)%以下
		1.1 mSv≤A : 5%以下	0.5 mGy≤A≤20 mGy : 3%以下
			20 mGy<A : 5%以下【同じ】
直線性	レスポンスの許容範囲 ^{*3,4}	0.91~1.11	A<0.5 mGy、20mGy≤A : 0.91~1.11【同じ】 0.5≤A<20 mGy : 0.95~1.05
エネルギー・方向特性 混合照射特性	試験方法 ^{*4}	測定量: $H_p(10)$ 照射方法: ファントムを用いた照射 入射角度: 0°, ±60°, ±75° (75°≤ α_{max} のとき), 90°	測定量: 空気カーマ又は空気吸収線量 照射方法: 自由空間中での照射 入射角度: 0°, ±60°, ±75° (75°≤ α_{max} のとき), ± α_{max} , 90°, ±(180°- α_{max}), ±105°, ±120°, 180°
	レスポンスの許容範囲 ^{*3,5}	12 keV≤E<33 keV : 0.67~2.00 33 keV≤E<65 keV : 0.69~1.82 65 keV≤E : 0.71~1.67	0.50~1.67
線量計の温度・湿度特性	最小定格範囲	温度: -10°C~+40°C 相対湿度: 10%~90%	温度: -20°C~+40°C 相対湿度: 10%~90%【同じ】
経時変化特性	最小定格範囲	測定時間: 1ヶ月間	測定時間: 3ヶ月間
リーダの安定性	最小定格範囲	測定時間: 1ヶ月間	測定時間: 3ヶ月間

^{*1} 本研究で用いた線量計は体幹部の $H_p(10)$ を測定するように設計されているので、 $H_p(10)$ に係るもののみ記載した。

^{*2} 太字は JIS Z 4346 と異なる箇所

^{*3} A は線量で JIS Z 4345 においては $H_p(10)$ 、JIS Z 4346 においては空気カーマもしくは空気吸収線量

^{*4} 簡単のため、不確かさに関する記載は割愛した。

^{*5} α_{max} は定格範囲内の放射線の入射角度の最大値

^{*6} E は入射光子のエネルギー

Table 2 温度特性試験における環境条件

	温度 (°C)	相対湿度 (%RH)	気圧 (hPa)
第 1 グループ	20.1 ~ 24.1	56 ~ 74	1002 ~ 1012
第 2 グループ	-20.5 ~ -20.3	31 ~ 69	1002 ~ 1011

Table 3 変動係数の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価

線量 (mGy)	基準(%)	指示値の平均	標準偏差	変動係数	判定
		\bar{G} (mGy)	s (mGy)	v (%)	
0.1	15	0.101	0.012	12	合格
0.2	12	0.211	0.012	5.7	合格
0.4	6	0.400	0.017	4.3	合格
0.8	4.311	0.791	0.032	4.1	合格
2	3.144	1.97	0.05	2.7	合格
3	3.144	2.96	0.07	2.2	合格
4	4.311	3.88	0.15	3.8	合格
8	3.144	8.10	0.16	2.0	合格
20	3.144	19.7	0.3	1.5	合格

Table 4 直線性の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価

線量, C (mGy)	$r_{\min} - U_{c,com}$		$\left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} - U_{com}\right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C}$		$\left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} + U_{com}\right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C}$	$r_{\max} + U_{c,com}$	判定
0.100±0.004	0.86	<	0.92		1.15	<	1.16 合格
0.199±0.007	0.86	<	0.94		1.14	<	1.16 合格
0.400±0.013	0.86	<	0.91		1.07	<	1.16 合格
0.801±0.026	0.90	<	0.93		1.07	<	1.10 合格
2.001±0.064	0.90	<	0.91		1.04	<	1.10 合格
4.00±0.13	0.90	<	0.96		1.10	≤	1.10 合格
8.00±0.25	0.91	<	0.93		1.08	<	1.10 合格
20.0±0.6	0.90	<	0.94		1.06	<	1.10 合格

Table 5 N-40, N-60 及び N-80;90° の S-Cs;0° に対する相対レスポンス

線質及び角度	相対レスポンス*
N-40;90°	2.28 (14%)
N-60;90°	2.11 (15%)
N-80;90°	1.68 (12%)

*()内は、相対拡張不確かさであり、約 95%の信頼の水準に相当するものである。

Table 6 エネルギー特性の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価

線質及び角度	$r_{\min} - U_{c,com}$		$\left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} - U_{com}\right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C}$		$\left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} + U_{com}\right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C}$	$r_{\max} + U_{c,com}$	判定
N-40;0°	0.46	<	1.04		1.10	<	1.71 合格
N-60;0°	0.46	<	1.01		1.06	<	1.71 合格
N-80;0°	0.46	<	0.93		1.00	<	1.71 合格
N-100;0°	0.46	<	0.98		1.11	<	1.71 合格
N-150;0°	0.46	<	1.14		1.22	<	1.71 合格
N-200;0°	0.46	<	1.08		1.16	<	1.71 合格
N-300;0°	0.46	<	0.96		1.03	<	1.71 合格
S-Co;0°	0.46	<	0.85		0.91	<	1.71 合格

Table 7 方向特性の JIS Z 4346:2017 に基づく適合性評価

線質及び角度	$r_{\min} - U_{c,com}$		$\left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} - U_{com}\right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C}$		$\left(\frac{\bar{G}}{\bar{G}_{r,0}} + U_{com}\right) \cdot \frac{C_{r,0}}{C}$	$r_{\max} + U_{c,com}$	判定
N-40;±60° (水平)	0.46	<	0.99		1.17	<	1.71 合格
N-60;±60° (水平)	0.46	<	1.00		1.07	<	1.71 合格
N-80;±60° (水平)	0.46	<	0.82		0.95	<	1.71 合格
N-40;+60° (up)	0.46	<	1.06		1.27	<	1.71 合格
N-60;+60° (up)	0.46	<	1.03		1.22	<	1.71 合格
N-80;+60° (up)	0.46	<	1.12		1.64	<	1.71 合格
N-40;-60° (down)	0.46	<	1.19		1.29	<	1.71 合格
N-60;-60° (down)	0.46	<	1.14		1.24	<	1.71 合格
N-80;-60° (down)	0.46	<	0.99		1.12	<	1.71 合格

Table 8 混合照射における評価レスポンスの例

照射条件 K	線量比率	照射条件 L	線量比率	評価レスポンス
N-40;0°	1	S-Cs;0°	9	0.57
N-40;60° (down)	5	S-Cs;60° (down)	5	0.78
N-80;45° (水平)	4	N-200;45° (水平)	6	0.71
N-40;0°	2	N-80;0°	8	0.96
N-80;60° (down)	5	N-100;60° (down)	5	1.38
N-100;15° (down)	5	S-Cs;15° (down)	5	1.29
N-150;0°	3	S-Cs;0°	7	1.04
N-150;45° (水平)	3	S-Cs;45° (水平)	7	1.03
N-150;45° (up)	3	S-Cs;45° (up)	7	1.05
N-150;45° (down)	3	S-Cs;45° (down)	7	1.03
S-Cs;60° (水平)	5	S-Co;60° (水平)	5	1.02

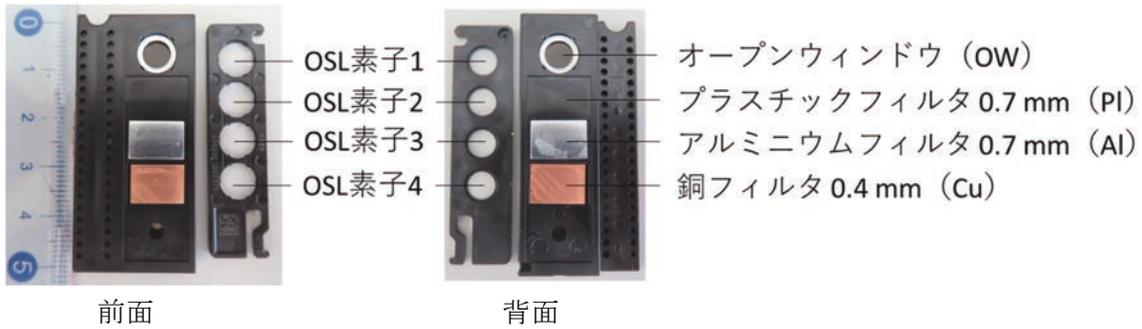


Fig.1 本研究で用いた OSL 線量計 (InLight 線量計)

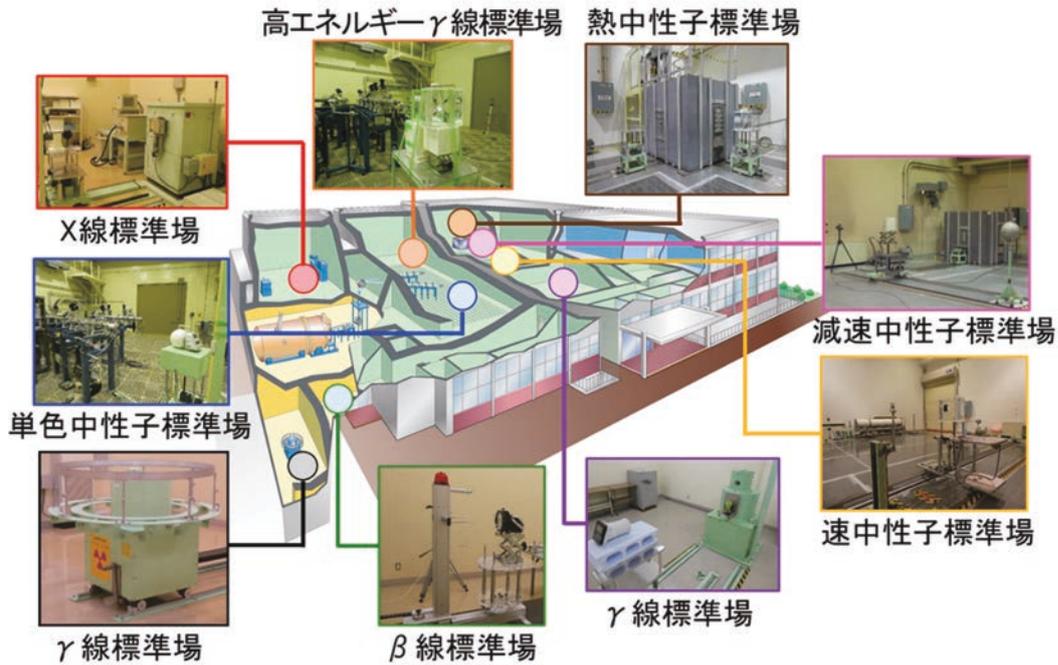


Fig.2 放射線標準施設棟の照射設備

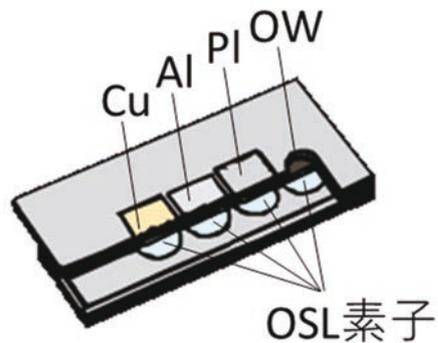


Fig.3 シミュレーション計算体系
線量計の周りは真空とした。

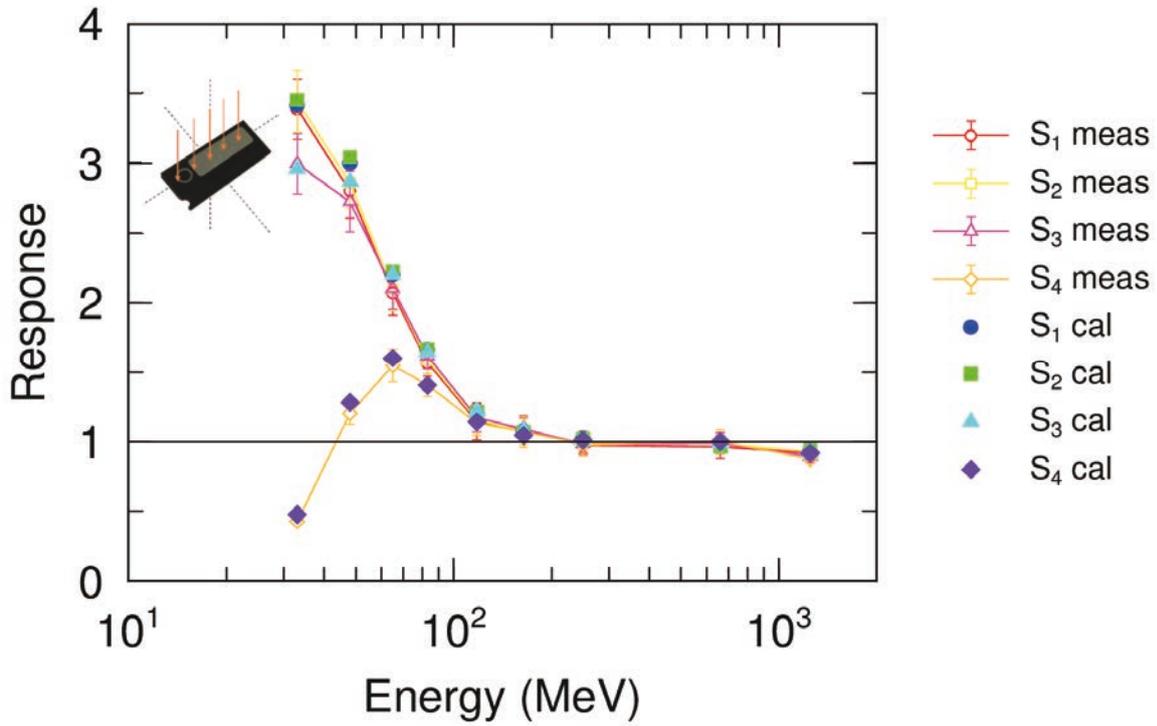


Fig.4 各素子の入射角度 0° に対するエネルギー応答特性 (計算と実測の比較)
各素子について、662 keV 光子の 0° 入射に対するレスポンスで規格化している。

S₁ から S₄ はそれぞれ素子 E₁ から E₄ の信号値を表す。

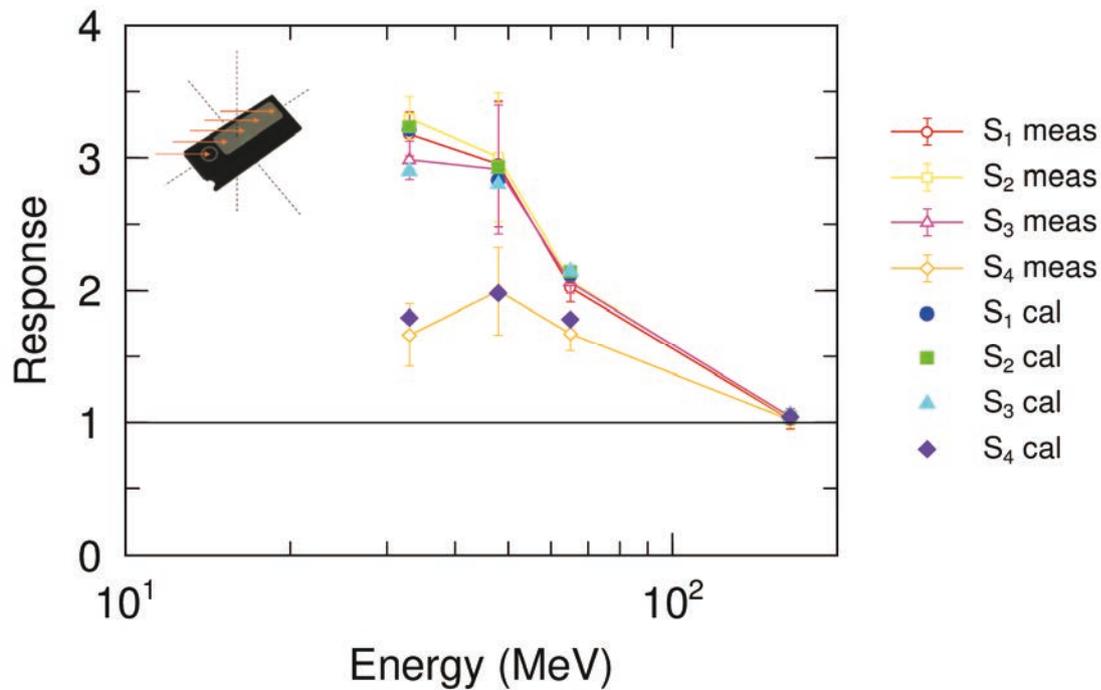


Fig.5 各素子の入射角度 up 60° に対するエネルギー応答特性 (計算と実測の比較)
各素子について、662 keV 光子の 0° 入射に対するレスポンスで規格化している。

S₁ から S₄ はそれぞれ素子 E₁ から E₄ の信号値を表す。

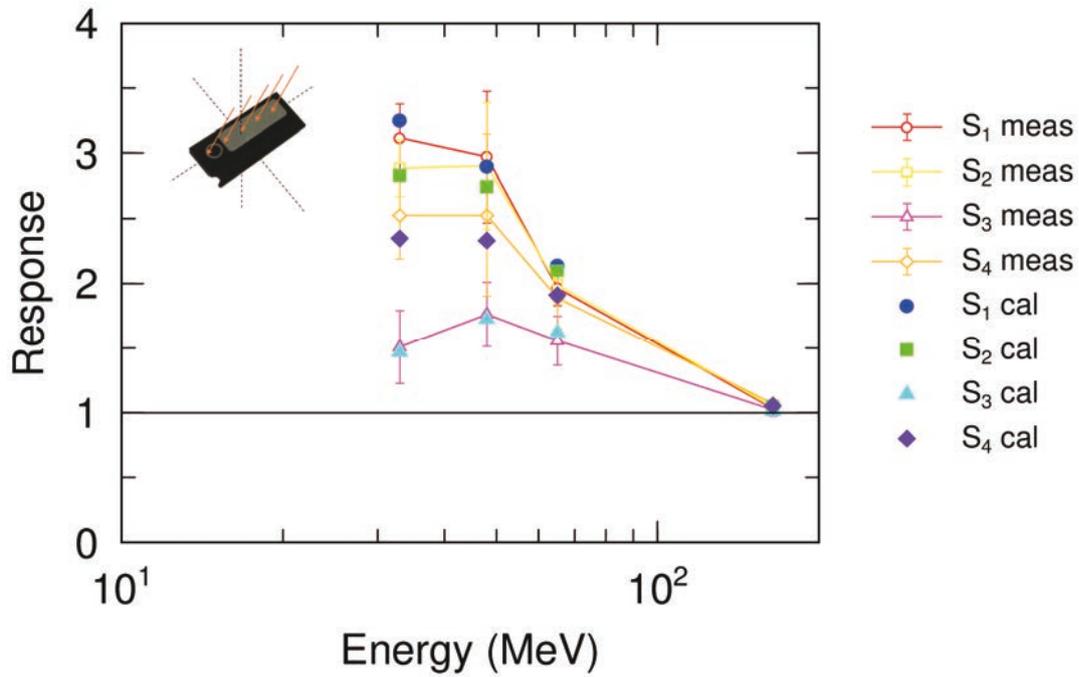


Fig.6 各素子の入射角度 down60° に対するエネルギー応答特性（計算と実測の比較）
 各素子について、662 keV 光子の 0° 入射に対するレスポンスで規格化している。
 S₁ から S₄ はそれぞれ素子 E₁ から E₄ の信号値を表す。

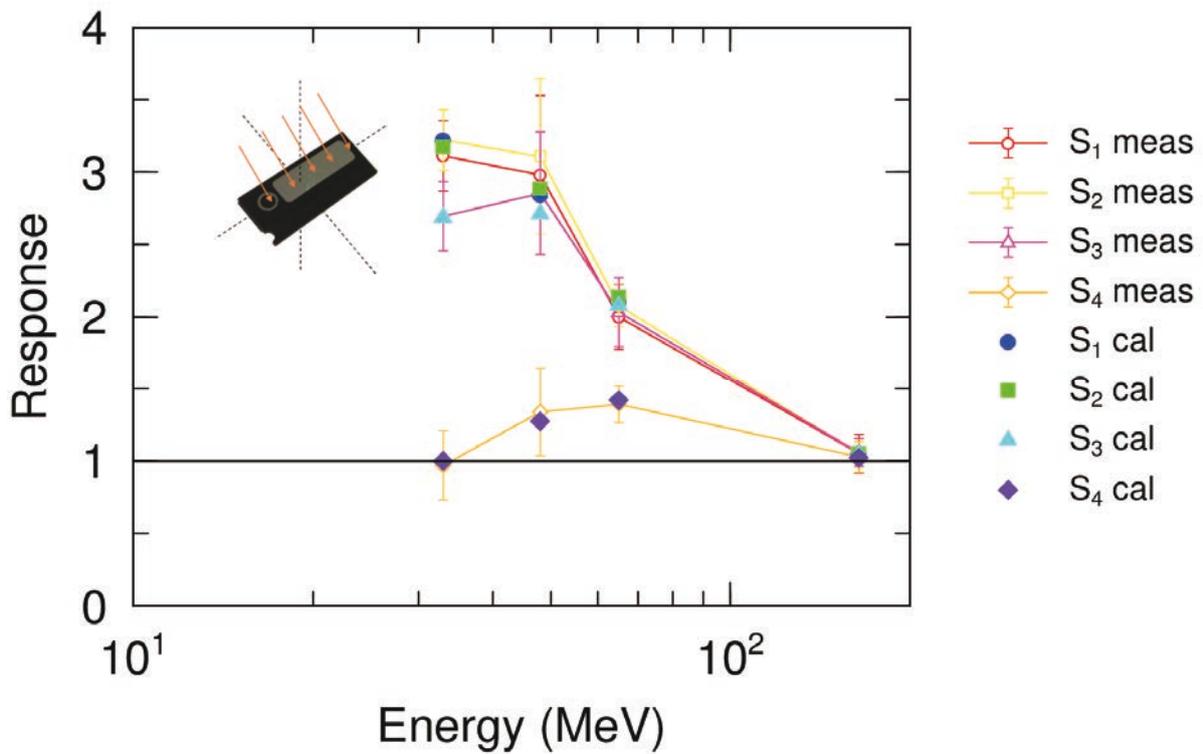


Fig.7 各素子の入射角度水平 60° に対するエネルギー応答特性（計算と実測の比較）
 各素子について、662 keV 光子の 0° 入射に対するレスポンスで規格化している。
 S₁ から S₄ はそれぞれ素子 E₁ から E₄ の信号値を表す。

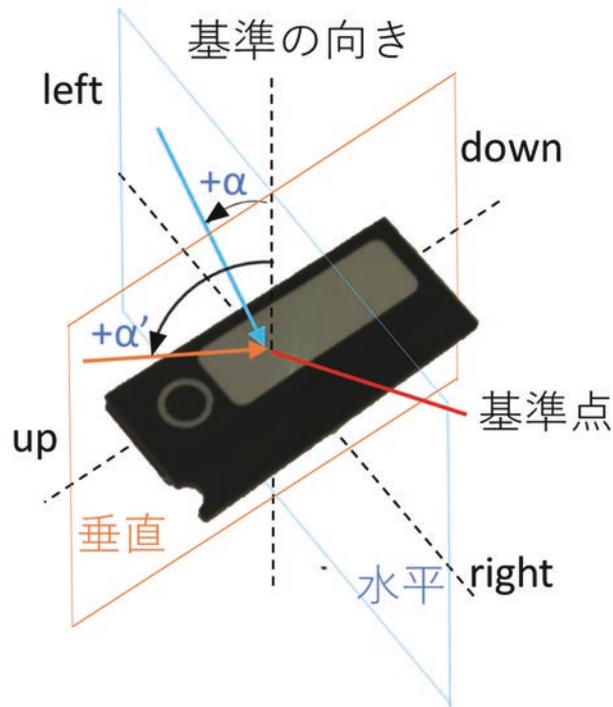


Fig.8 線量計の基準点及び基準の向き，入射角度

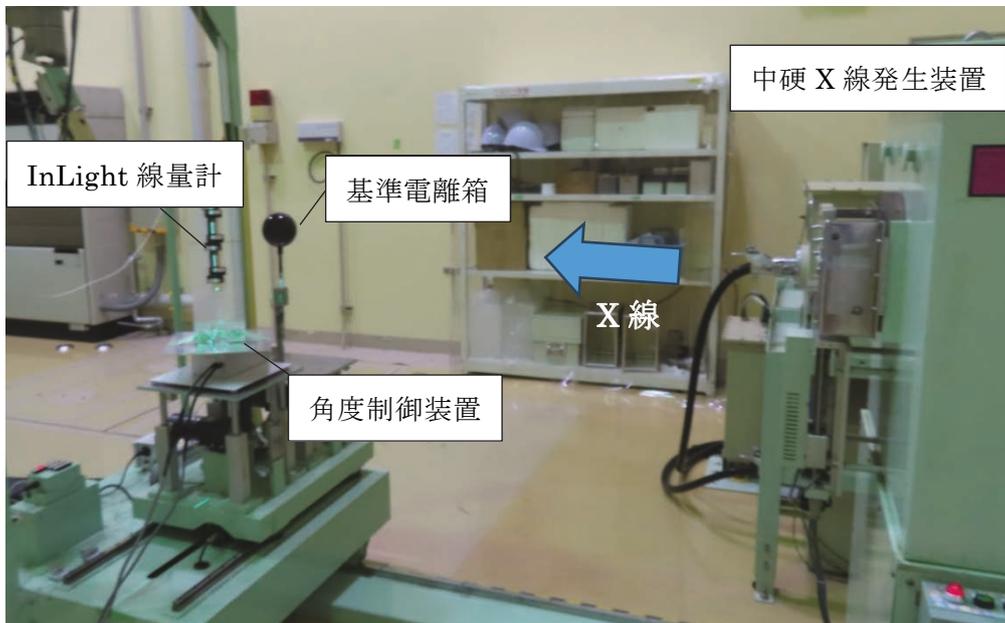


Fig.9 X線照射設備を使用したエネルギー・方向特性試験の様子

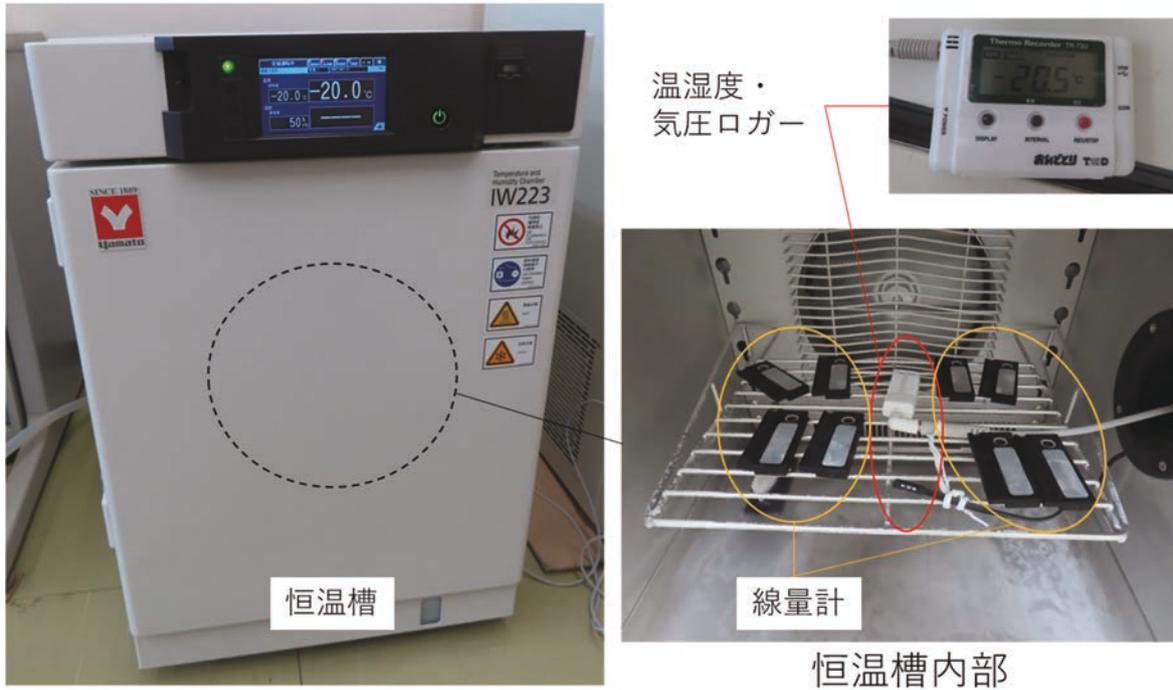


Fig.10 線量計の温度特性試験の様子

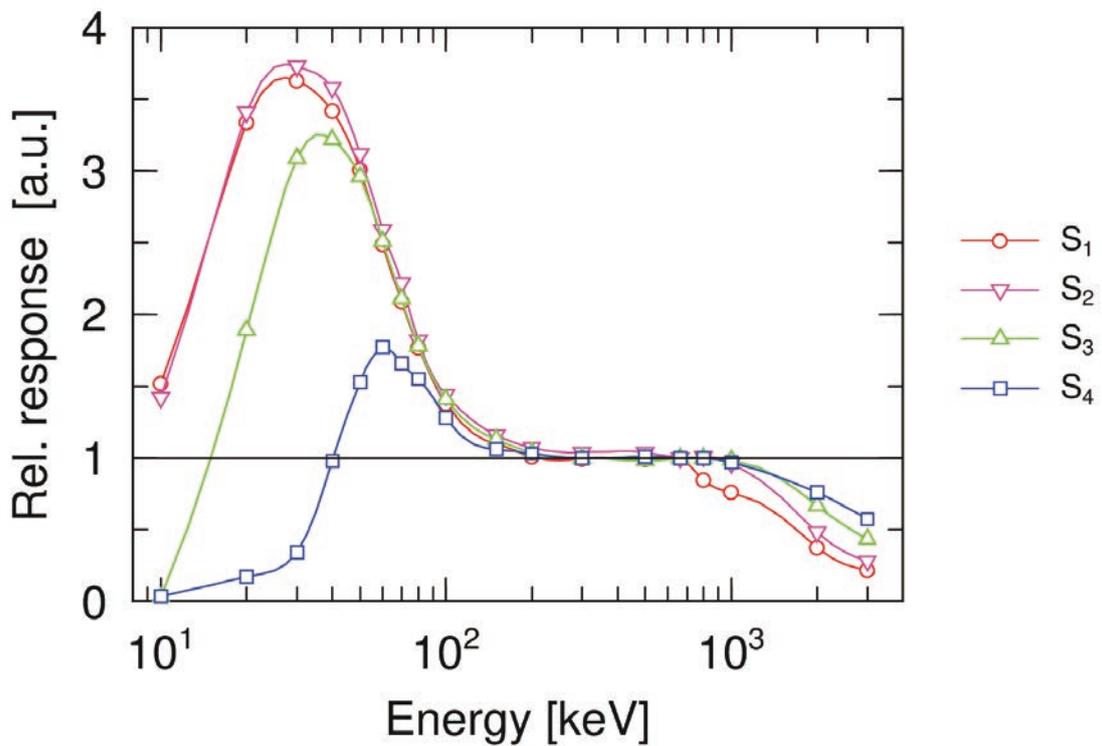


Fig.11 計算評価した単色光子入射（入射角度 0° ）に対する各素子のレスポンス
各素子について、662 keV 光子の 0° 入射に対するレスポンスで規格化している。

S₁ から S₄ はそれぞれ素子 E₁ から E₄ の信号値を表す。

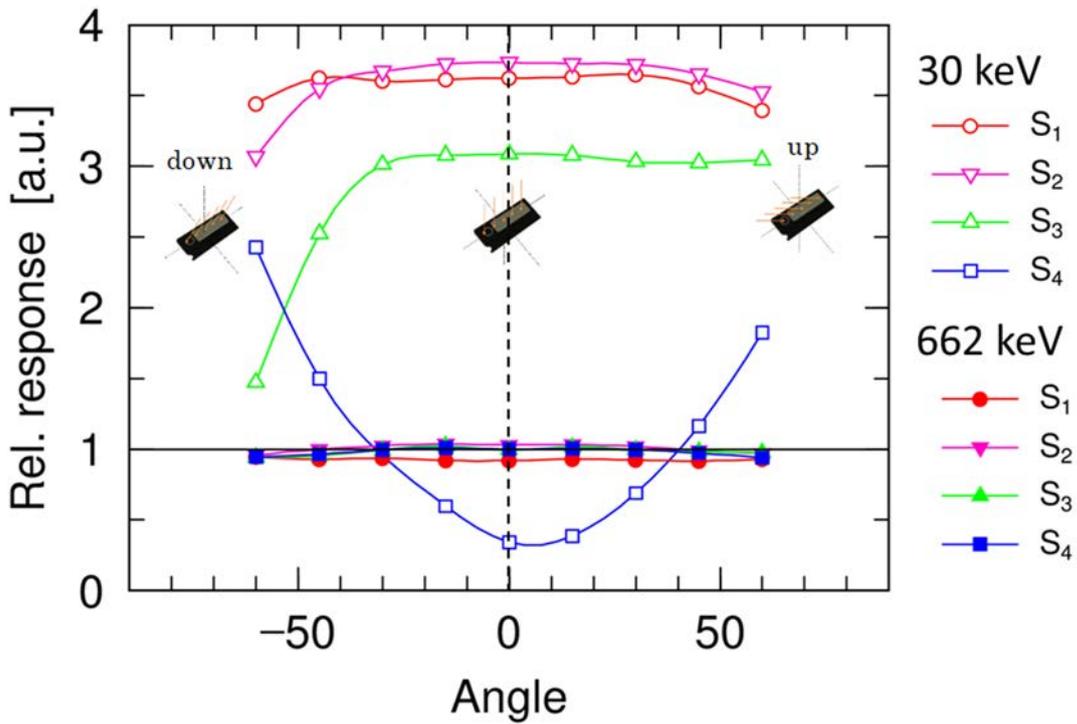


Fig.12 計算評価した 30 keV 及び 662 keV 光子に対する各素子の応答の方向特性
 662 keV 光子の 0° 入射に対する $\bar{S} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 S_i$ で規格化している。
 S_1 から S_4 はそれぞれ素子 E_1 から E_4 の信号値を表す。

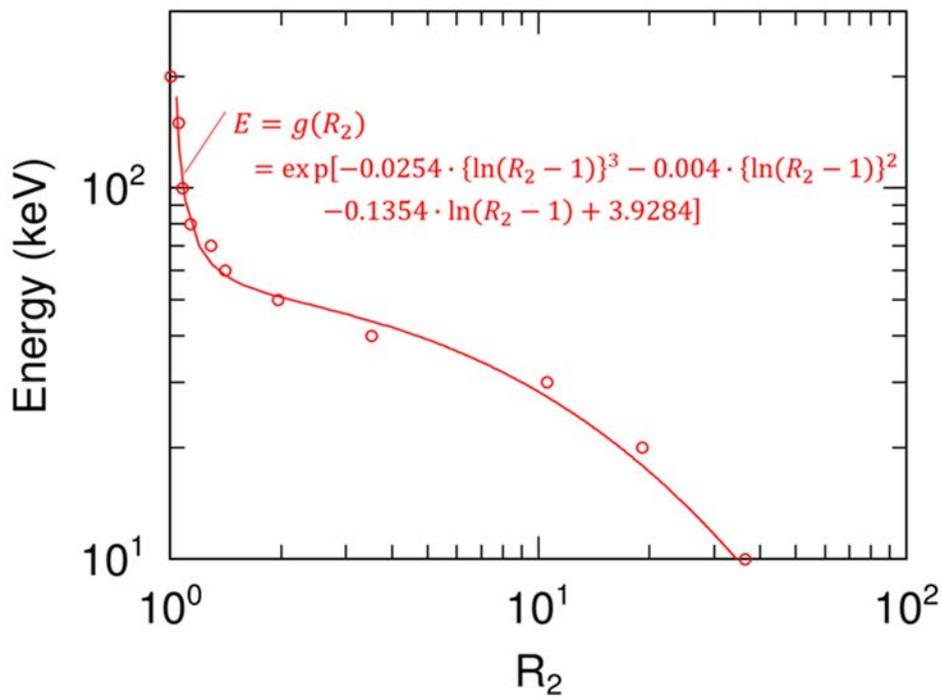


Fig.13 0° 入射に対する $R_2 = S_2/S_4$ と入射光子エネルギーの関係性
 図中の曲線はフィッティング曲線であり、図中の式はフィッティング関数である。

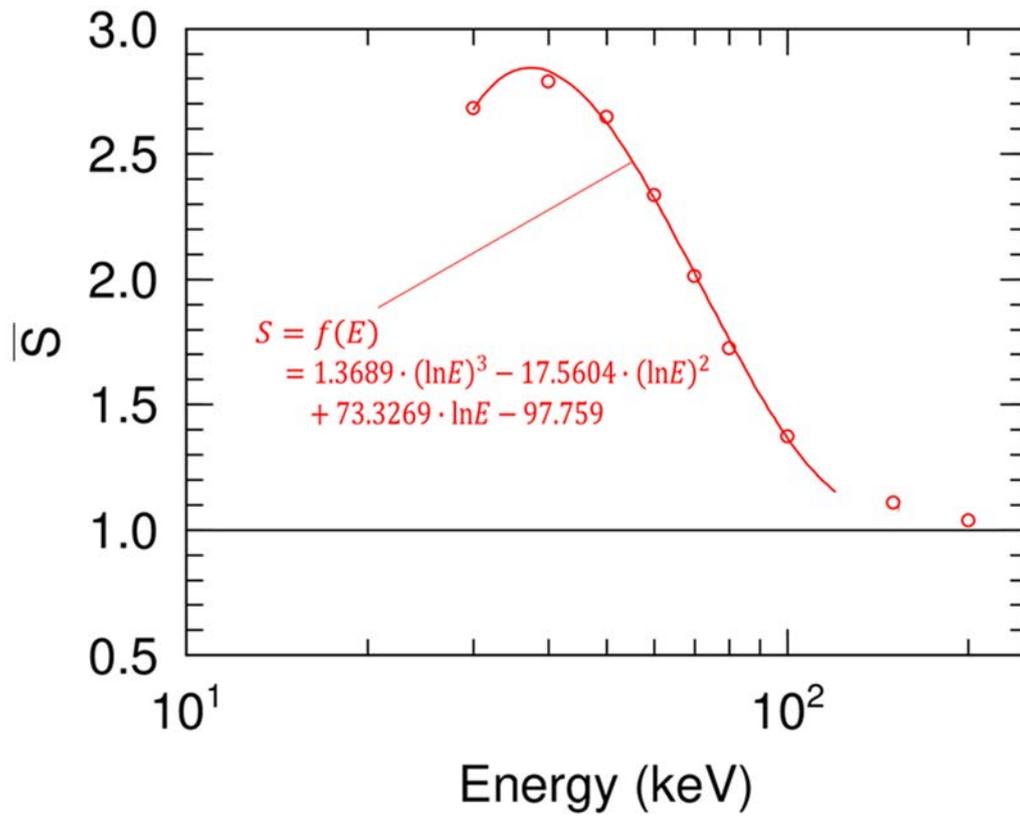
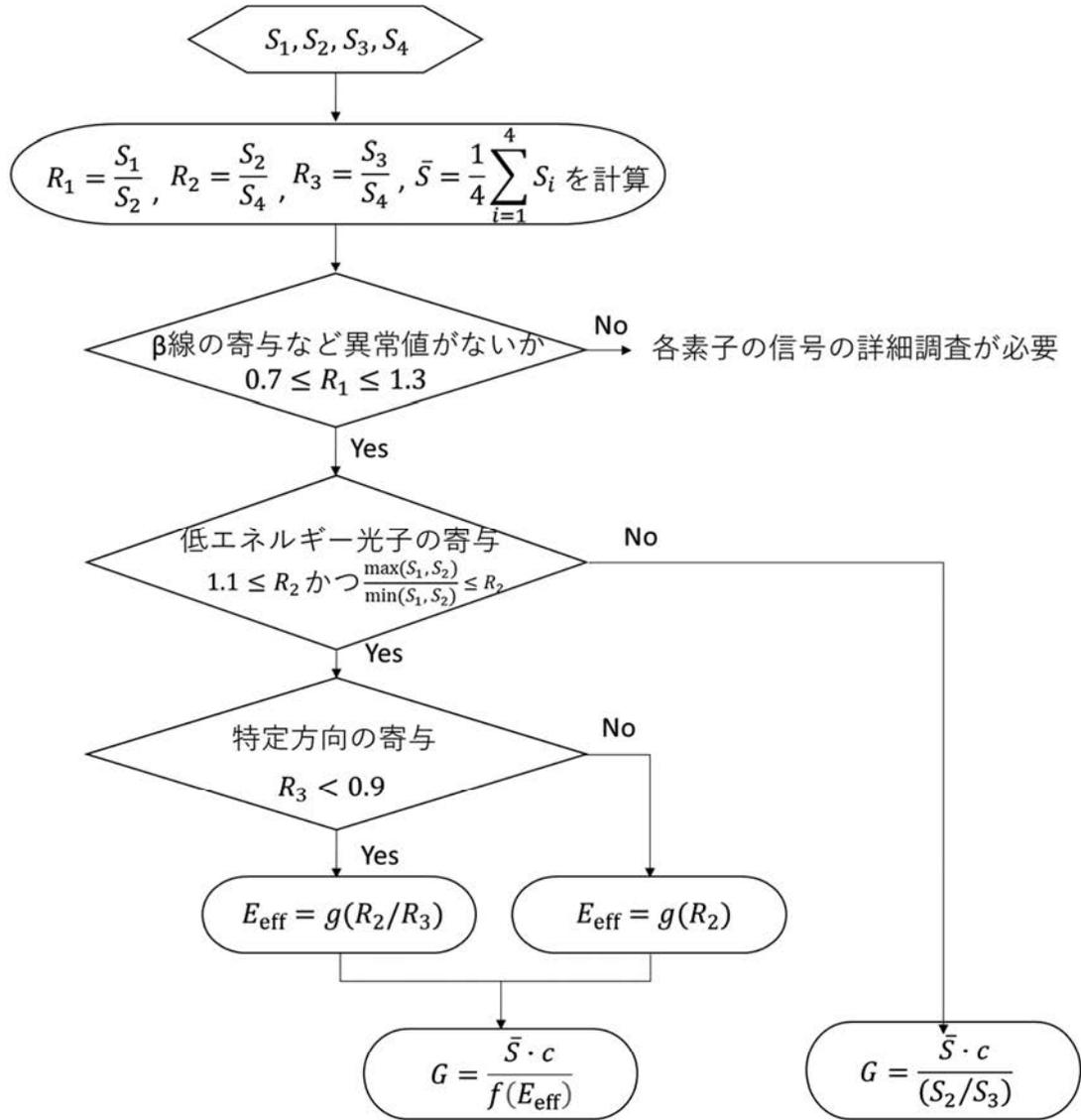


Fig.14 0° 入射に対する素子の信号の平均 \bar{S} のエネルギー依存性
 図中の曲線はフィッティング曲線であり，図中の式はフィッティング関数である。



ここで、

c は換算定数 (mGy/counts)

$$f(E_{\text{eff}}) = 1.3689 \cdot (\ln E_{\text{eff}})^3 - 17.5604 \cdot (\ln E_{\text{eff}})^2 + 73.3269 \cdot \ln E_{\text{eff}} - 97.759$$

$$g(X) = \exp[-0.0254 \cdot \{\ln(X-1)\}^3 - 0.004 \cdot \{\ln(X-1)\}^2 - 0.1354 \cdot \ln(X-1) + 3.9284]$$

Fig.15 作成した線量評価アルゴリズム

$f(E_{\text{eff}})$ は Fig.14 に示されるフィッティング関数であり、

$g(X)$ は Fig.13 に示されるフィッティング関数である。

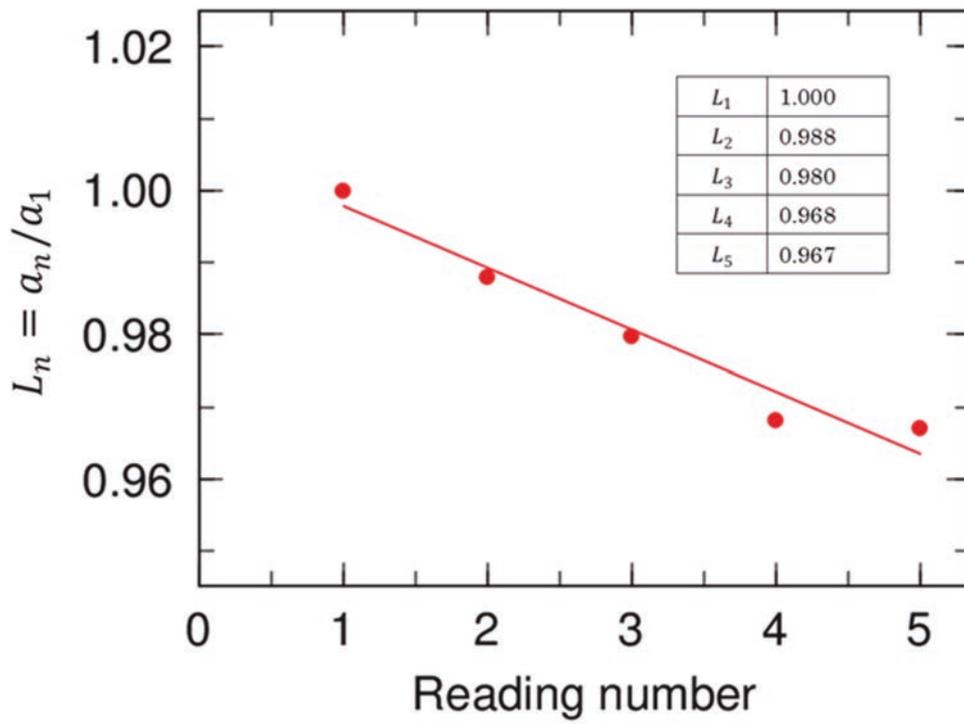


Fig.16 複数回読み取りに伴う信号量損失割合

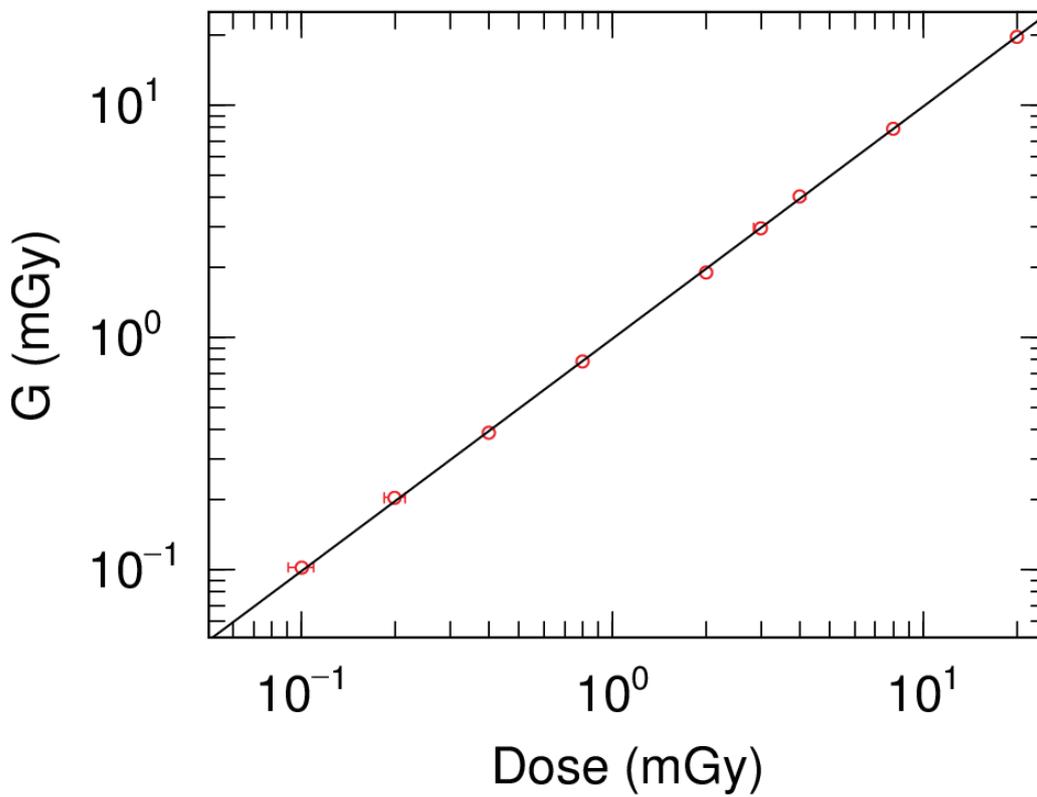


Fig.17 線量直線性

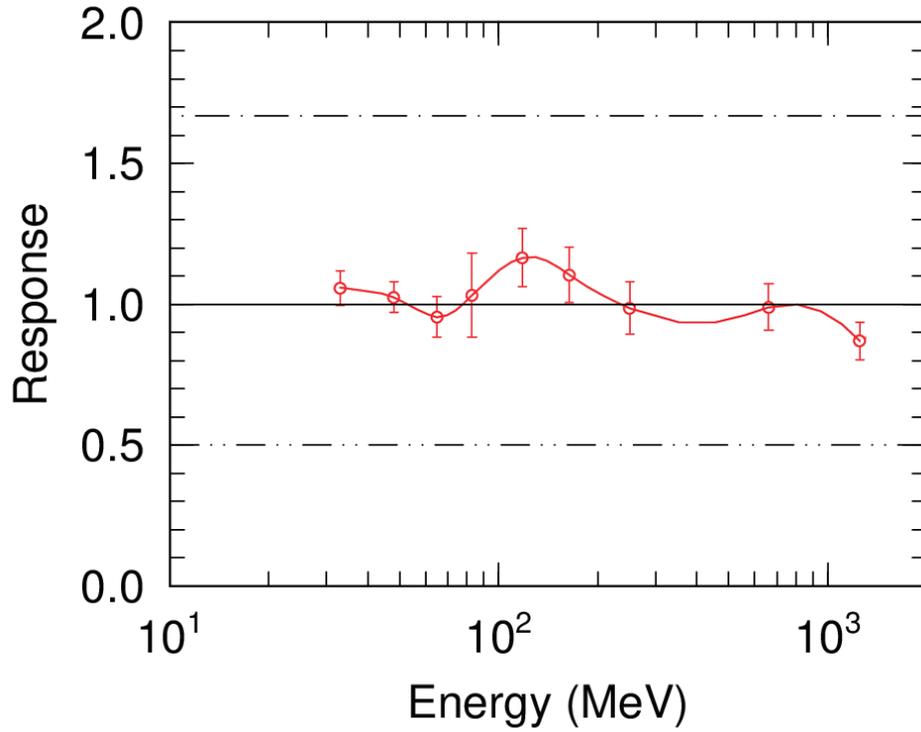


Fig.18 エネルギー特性
破線は JIS で示される許容範囲幅である。

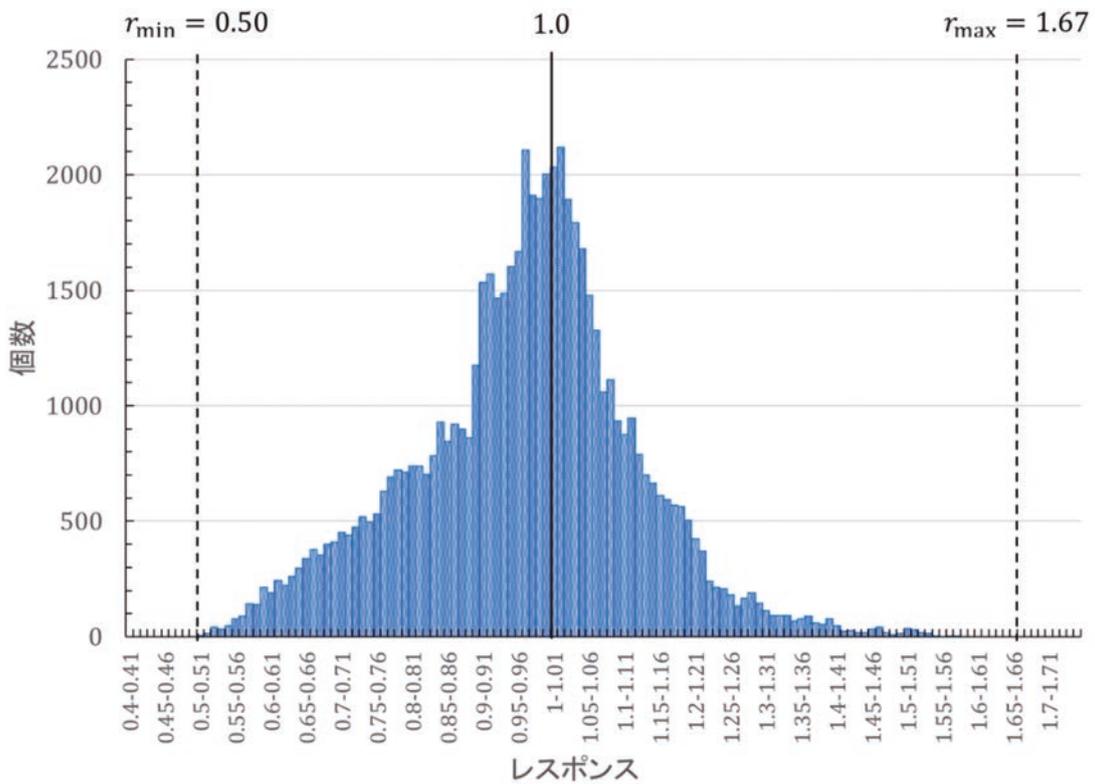


Fig.19 混合照射条件 (61,074 通り) におけるレスポンスの分布
破線 (0.50~1.67) は JIS で示される許容範囲幅である。

