

自己出力型放射線検出器の試験結果の理論的検証

— ^{60}Co ガンマ線照射試験結果と計算結果との比較 —

Theoretical Verification of Test Results for Self-powered Radiation Detectors
-Comparison of ^{60}Co Gamma Irradiation Test Results with Calculated Results-

武田 遼真 柴田 裕司 武内 伴照 中野 寛子
関 美沙紀 井手 広史

Ryoma TAKEDA, Hiroshi SHIBATA, Tomoaki TAKEUCHI, Hiroko NAKANO
Misaki SEKI and Hiroshi IDE

大洗原子力工学研究所
環境技術開発部

Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development
Oarai Nuclear Engineering Institute

March 2025

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

自己出力型放射線検出器の試験結果の理論的検証 —⁶⁰Co ガンマ線照射試験結果と計算結果との比較—

日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所 環境技術開発部

武田 遼真、柴田 裕司*、武内 伴照、中野 寛子、関 美沙紀、井手 広史

(2024 年 12 月 3 日受理)

日本原子力研究開発機構（旧日本原子力研究所を含む）では過去 30 年以上、自己出力型の中性子検出器 (Self-Powered Neutron Detector: SPND) やガンマ線検出器 (Self-Powered Gamma Detector: SPGD) の開発・照射試験が行われており、複数の研究成果が報告されている。

本稿では、これらの試験結果に対して、JAEA 報告書『自己出力型放射線検出器の出力電流値計算コードの作成』(JAEA-Data/Code 2021-018) において作成した計算コードによる理論的な出力結果との比較・検証を行った。比較対象はコバルト 60 ガンマ線照射施設 SPGD の照射試験結果とした。その結果、ガンマ線によるコンプトン散乱電子の飛程に対して比較的にエミッタ径が細い場合には計算結果は試験結果を良く再現することが分かった。一方、比較的にエミッタ径が太い場合には計算結果と比較して試験結果における出力電流値は半分程度にとどまった。エミッタ径の違いによる差異が生じた要因としてエミッタによる自己遮蔽効果が考えられ、エミッタ径が太い場合やガンマ線場が等方的でない条件に由来する自己遮蔽による影響を、計算コードにおける電子の平均飛程や平均最小エネルギーの変化として採り入れる等の新たな定式化が必要であると思われる。

**Theoretical Verification of Test Results for Self-powered Radiation Detectors
- Comparison of ^{60}Co Gamma Irradiation Test Results with Calculated Results -**

Ryoma TAKEDA, Hiroshi SHIBATA*, Tomoaki TAKEUCHI, Hiroko NAKANO,
Misaki SEKI and Hiroshi IDE

Department of Waste Management and Decommissioning Technology Development
Oarai Nuclear Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 3, 2024)

Japan Materials Testing Reactor (JMTR) in Oarai Research and Development Institute of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been developing various reactor materials, irradiation techniques and instruments for more than 30 years. Among them, the development of self-powered neutron detectors (SPNDs) and gamma detectors (SPGDs) has been carried out, and several research results have been reported.

In this report, we compare and verify these test results with the theoretical output results obtained by the calculation code created in the JAEA report (JAEA-Data/Code 2021-018). The comparison was made with the irradiation test results of SPGD, a cobalt-60 gamma irradiation facility. As a result, it was found that the calculation results reproduced the test results well when the emitter diameter was relatively small compared to the range of Compton scattered electrons by the gamma rays. On the other hand, when the emitter diameter is relatively large, the output current in the test results is only about half of the calculated output current. The self-shielding effect of the emitter may be one of the reasons for the difference in the emitter diameter, and a new formulation, such as incorporating the effect of self-shielding caused by a larger emitter diameter or a non-isotropic γ -ray field as a change in the mean electron range or mean minimum energy in the calculation code, is necessary. The new formulation is necessary.

Keywords: Self-powered Detector, SPND, SPGD, Numerical Calculation

* Formerly Analysis and Research Laboratory Development Department, Okuma Analysis and Research Center, until September 2022.

目 次

1. 序論	1
2. 試験結果の評価に係る理論的準備	2
2.1 ガンマ線照射における線量率を用いた粒子フルエンス率の算出	2
2.2 空間電荷効果を考慮した検出器の出力電流値の算出	4
2.3 最大電位の位置 d_p 及び電流に寄与する電子の平均最小エネルギー E_{MIN} の算出	5
2.4 読込データの準備	8
3. ガンマ線照射試験結果と計算値の比較	11
3.1 ガンマ線照射試験の概要	11
3.2 読込データの準備と計算結果の整理	12
3.3 結果の比較と考察	14
4. まとめ	18
謝辞	19
参考文献	19
付録 表・チェックシート・ログファイル等	20

Contents

1. Introduction -----1

2. Theoretical Preparations for Evaluation of Experiment Result -----2

 2.1 Calculation of Particle Fluence Rate Using Dose Rate in Gamma-ray Irradiation ----2

 2.2 Calculation of the Output Current of the Detector in Consideration
 of Space Charge Density Effect -----4

 2.3 Calculation of the Position " d_p " of the Maximum Electric Potential
 and the Average Minimum Kinetic Energy " $EMIN$ " of Electron -----5

 2.4 Preparations of Input Data for Numerical Calculation Code -----8

3. Comparison of the Gamma-ray Irradiation Experiment Results ----- 11

 3.1 Outline of Gamma-ray Irradiation Experiment ----- 11

 3.2 Preparations of Input Data and Arrangement of the Calculation Result ----- 12

 3.3 Comparison of the Results and Discussion ----- 14

4. Concluding Remarks ----- 18

Acknowledgements ----- 19

References ----- 19

Appendix Tables, Check Sheets, Log Files -----20

1. 序論

稼働中の原子炉の炉心近傍や極小の空間における放射線計測においては、小型かつ外部電力を必要とせず単純な構造を有する自己出力型放射線検出器（Self-Powered Detector: SPD）が有用となる。

SPDには中性子検出器（Self-Powered Neutron Detector: SPND）及びガンマ線検出器（Self-Powered Gamma Detector: SPGD）があり、日本原子力研究開発機構（原子力機構）大洗原子力工学研究所に設置されている材料試験炉（Japan Materials Testing Reactor: JMTR）では過去30年以上にわたって同検出器の開発及び照射試験が行われてきた。一方で、出力値に関する理論的な解析や評価はあまり行われてこなかった。

執筆者らは、理論的な解析・評価を行うための準備として、1974年にH.D.WarrenとN.H.Shahが著した論文『Neutron and Gamma-Ray Effects on Self-Powered In-Core Radiation Detectors』¹⁾を基に数値計算コードを作成し、JAEA-Data/Code 2021-018『自己出力型放射線検出器の出力電流値計算コードの作成』²⁾にまとめた。

本稿では、上述の数値計算コードを用いた数値計算結果について、SPDの照射試験による出力値との比較を行い、コードの計算精度や課題を明らかにする。

2. 試験結果の評価に係る理論的準備

本章ではSPDの照射試験結果を理論的な計算結果と比較評価するため、数値計算コードの実行に必要な情報の整理を行う。

2.1 ガンマ線照射における線量率を用いた粒子フルエンス率の算出

旧日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所（現量子科学技術研究開発機構高崎量子技術基盤研究所: QST 高崎研）のガンマ線照射施設コバルト第1棟、第2棟におけるSPGDへのガンマ線照射試験では、当該試験と並行してアラニン線量計を用いた線量率（単位は[kGy hour⁻¹]）の測定も行っており、この線量率に対応させてSPGDの出力電流値の整理が行われた。しかし、計算コードを用いて出力電流値の計算を行うためには線量率ではなく粒子フルエンス率（単位は[個 cm⁻² sec⁻¹]）の値が必要となる。そこで本節では線量率から粒子フルエンス率を求めるための方法について記す。

粒子フルエンス率は、線量率の測定に用いたアラニン線量計の積算線量と質量エネルギー吸収係数から算出することができる³⁾。

まず、物質中において入射ガンマ線のエネルギー（エネルギーフルエンス）は光電効果・コンプトン効果・電子対生成等の相互作用により減衰する。これを式で示すと以下ようになる。

$$-\frac{d\Psi}{dx} = \mu_{TR}\Psi$$

上式において、用いられる文字の定義を以下に示す。

Ψ : エネルギーフルエンス(= $E_{\gamma}\Phi$) (単位は[J cm⁻²])

Φ : 粒子フルエンス (単位は[個 cm⁻²])

E_{γ} : ガンマ線のエネルギー (単位は[J])

μ_{TR} : エネルギー転移係数 (単位は[cm⁻¹])

ここで、相互作用によって物質内で失われたエネルギーは、その全てが物質内に蓄積される訳ではなく、電子等の荷電粒子の加速度運動により生じる制動放射線としてエネルギーの一部が外部へと流出する。このエネルギーの流出割合を G とおき、エネルギー吸収係数 μ_{en} を次のように定義する。

$$\mu_{en} = \mu_{TR}(1 - G)$$

また、エネルギー吸収係数 μ_{en} を密度 ρ [g cm⁻³]で除した質量エネルギー吸収係数 μ_{em} (単位は[cm² g⁻¹]) を次のように定義する。

$$\mu_{em} = \frac{\mu_{en}}{\rho}$$

質量エネルギー吸収係数 μ_{em} は物質固有の値で、物質の衝突カーマ K_c （入射したエネルギーの内、制動放射線のエネルギーが差し引かれたもの。物質内に蓄積したエネルギー。単位は[Gy]=[J kg⁻¹])はこれを用いて次のように表される。なお、式中の"1000"は質量の単位を変換するための係数(1000[g kg⁻¹])である。

$$K_c = 1000\mu_{em}\Psi$$

被照射物の積算吸収エネルギー E （単位は[J]）と質量 M （単位は[kg]）を用いてエネルギーに関する方程式を立てると次のようになる。

$$E = K_c M = 1000\mu_{em}M\Psi$$

これらから、エネルギーフルエンス Ψ 及び粒子フルエンス Φ を求めると以下のようになる。なお、粒子フルエンスの式の中では、あえて" (E/M) "を括弧で目立たせているが、この部分は積算線量の値([Gy]=[J kg⁻¹])をそのまま代入できる箇所を示すため、このように記載にした。

$$\Psi = \frac{E}{1000\mu_{em}M} \quad \Phi = \frac{\Psi}{E_\gamma} = \frac{E}{1000\mu_{em}ME_\gamma} = \frac{1}{1000\mu_{em}E_\gamma} \cdot \left(\frac{E}{M}\right)$$

最後に、粒子フルエンス率を求めるには、上式の粒子フルエンス Φ を照射時間で除する必要がある。

以上の整理の基、具体的な計算例として線量率が 1[kGy hour⁻¹]の場合の粒子フルエンス率 $F(1\text{kGy hour}^{-1})$ [個 cm⁻² sec⁻¹]を求めると次のようになる。

$$F(1\text{kGy hour}^{-1}) = \Phi(\text{個 cm}^{-2} \text{sec}^{-1}) = \frac{1}{3.6 \times 10^3 \mu_{em} E_\gamma}$$

コバルト 60 線源が放射するガンマ線の平均エネルギーを 2.007×10^{-13} [J] (=1.253[MeV])、入射ガンマ線のエネルギー1.25[MeV]におけるアラニン線量計の質量エネルギー吸収係数を 2.878×10^{-2} [cm² g⁻¹]とすると最終的に以下の値が得られる。

$$F(1\text{kGy hour}^{-1}) = 4.809 \times 10^{10}[\text{個 cm}^{-2} \text{sec}^{-1}]$$

この他、幅広いエネルギースペクトル $\phi(E_\gamma)$ を持つガンマ線源を用いた照射の場合は、次式に示す平均のエネルギー \bar{E}_γ を用いて粒子フルエンス率の算出を行う。

$$\bar{E}_\gamma = \int_0^{E_{max}} E_\gamma \cdot \phi(E_\gamma) dE_\gamma \quad \ast \int_0^{E_{max}} \phi(E_\gamma) dE_\gamma = 1$$

2.2 空間電荷効果を考慮した検出器の出力電流値の算出

SPDが発生する出力電流値の算出では、エミッタから放出される電子だけではなく、検出器の被覆であるシース（コレクタ）からの寄与、即ち「エミッタ→シース（コレクタ）」とは逆向きの電子の流れ「シース（コレクタ）→エミッタ」についても勘案しなければならない。

また、このとき絶縁材中に保持される電荷による空間電荷効果についても考慮する必要がある。ここでSPD検出部の概略構造を Fig.2.1 に示す。

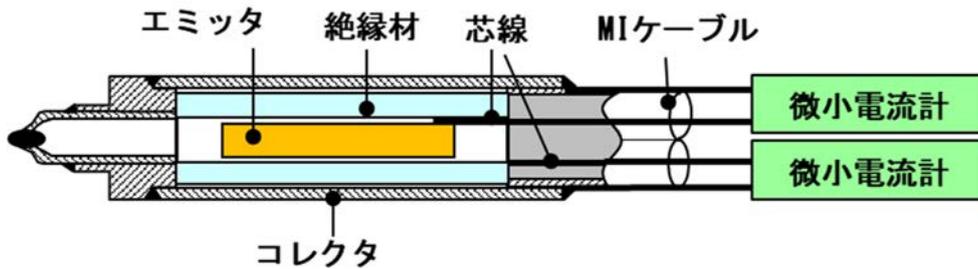


Fig.2.1 SPDの構造概念図

Warren らの論文¹⁾において出力電流値 I_γ の具体的な計算式は以下のように示され、 $d_p, EMIN_l, EMIN_s$ 等いくつかの未知数について事前に検討を行う必要がある。

$$I_\gamma = d_l L \left(\frac{K_l Z_l}{A_l} \right) [T(E_\gamma, EMIN_l) + Z_l^4 D(E_\gamma, EMIN_l)] - \frac{d_p^2}{d_s^2} L \left(\frac{K_s Z_s}{A_s} \right) [T(E_\gamma, EMIN_s) + Z_s^4 D(E_\gamma, EMIN_s)]$$

上式に含まれる文字及び関数の定義は以下の通りである。

d_l, d_s : エミッタの外径及びシース（コレクタ）の内径

d_p : 絶縁材中に存在する最大電位の位置（直径）

L : エミッタの長さ

K_l, K_s : 密度と線阻止能の逆数を掛けたもので、それぞれエミッタ及びシース（コレクタ）の値。エネルギーに対して変化する値で、厳密には定数ではないが、エネルギーが0.2~6.0[MeV]の範囲の加重平均値として $6.5 \times 10^{-4} [\text{g cm}^{-2} \text{keV}^{-1}]$ としている。

Z_l, Z_s : エミッタ及びシース（コレクタ）の原子番号

A_l, A_s : エミッタ及びシース（コレクタ）の原子量

E_γ : ガンマ線のエネルギー

$EMIN_l, EMIN_s$: 電流発生に寄与するガンマ線の平均最小エネルギーで、それぞれエミッタ及びシース（コレクタ）の値。

$T(E_\gamma, EMIN)$: コンプトン効果による発生電流 $I_{\gamma ce}$ に対して定めた関数（詳細は前著²⁾参照）

$$T(E_\gamma, EMIN) = \left(\frac{A}{d \cdot L \cdot K \cdot Z} \right) I_{\gamma ce}$$

$D(E_\gamma, E_{MIN})$: 光電効果による発生電流 $I_{\gamma pe}$ に対して定めた関数 (詳細は前著²⁾参照)

$$D(E_\gamma, E_{MIN}) = \left(\frac{A}{d \cdot L \cdot K \cdot Z^5} \right) I_{\gamma pe}$$

ここまでの記載は検出器外部から入射するガンマ線により生じる電流に着目したものであるが、中性子捕獲を起因とした検出器内部で発生するガンマ線により生じる電流に対しても同様の演算を適用することが可能である。

2.3 最大電位の位置 d_p 及び電流に寄与する電子の平均最小エネルギー E_{MIN} の算出

下図に最大電位の位置 d_p と電子の平均最小エネルギー E_{MIN} の関係を示す。前節の式より出力電流値の計算では両方の値が必要であり、始めに d_p を求めてから、 E_{MIN} を算出する。 E_{MIN} の計算フローを Fig.2.2 に示す。

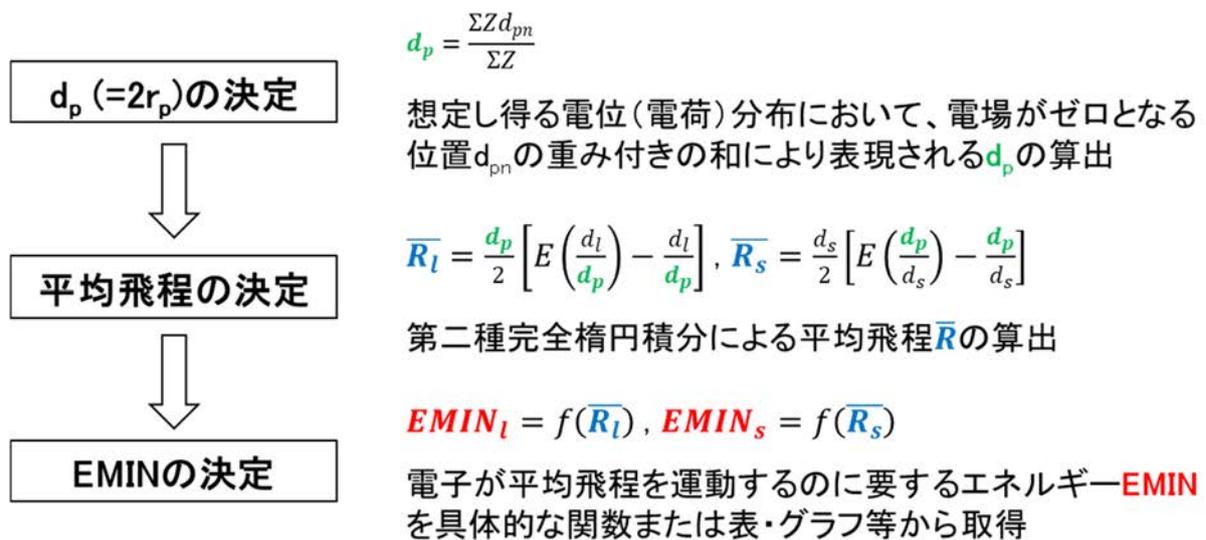


Fig.2.2 E_{MIN} の計算フロー

絶縁材中における最大電位の位置 d_p の算出に関して、Warren らの論文¹⁾においては絶縁材中における電荷の分布は半径に反比例するとされているが、その後の Mahant らの論文⁴⁾では実験値に近い値を表現するための電荷分布について研究がなされており、本稿ではこれを用いて実験結果の比較を行うこととした。

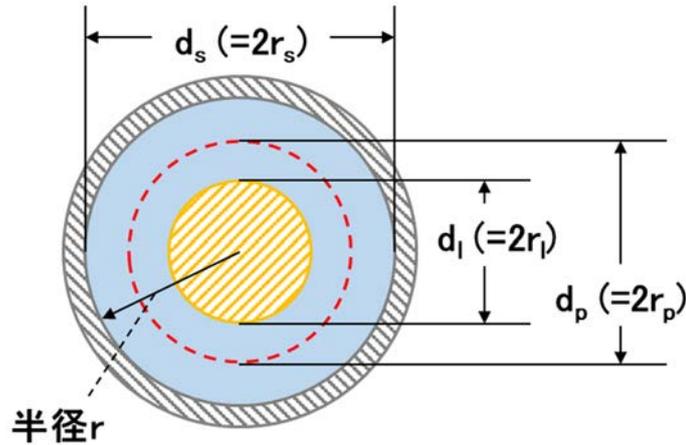


Fig.2.3 絶縁材中の最大電位の位置 d_p

Fig.2.3 に示すように検出器の構造的なパラメータを定義し、Mahant らの論文⁴⁾において記されている絶縁材中の電荷分布とそれに対応する最大電位の位置を以下に記す。なお、各式はエミッタとシース（コレクタ）の原子番号の大小関係によって使い分ける必要がある。

- (1) エミッタの原子番号 Z_l がシース（コレクタ）の原子番号 Z_s より大きい場合($Z_l > Z_s$)

$$\rho(r) = \frac{Z_0^4 r^{-2} + Z_0 r^{-1} + Z_0^2 + Z_0^2 r}{Z_0^4 + Z_0 + Z_0^2 + Z_0^2}$$

$$r_p = \frac{Z_0^4 r_{p(-2)} + Z_0 r_{p(-1)} + Z_0^2 r_{p(0)} + Z_0^2 r_{p(1)}}{Z_0^4 + Z_0 + Z_0^2 + Z_0^2}$$

- (2) エミッタの原子番号 Z_l がシース（コレクタ）の原子番号 Z_s より小さい場合($Z_l < Z_s$)

$$\rho(r) = \frac{Z_0^2 r + Z_0^5 r^2}{Z_0^2 + Z_0^5}$$

$$r_p = \frac{Z_0^2 r_{p(1)} + Z_0^5 r_{p(2)}}{Z_0^2 + Z_0^5}$$

各々の式で用いられる文字の定義は以下の通りである。詳細な補足は付録に記載する。

$$Z_0 = \frac{Z_s}{Z_l}, \quad k = \frac{r_l}{r_s}, \quad r_{p(n)} = \begin{cases} r_s \sqrt{k} & (n = -2) \\ r_s \left\{ \frac{1 - k^{n+2}}{(n+2) \ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{n+2}} & (n \geq -1) \end{cases}$$

上述の (1)、(2) より最大電位の位置 $d_p (= 2r_p)$ が求められるので、これを用いて電子の平均最小エネルギー $EMIN$ を求める。

前節で記した電流の式においては $EMIN_l$ と $EMIN_s$ の 2 種類の $EMIN$ が必要であり、 $EMIN_l$ は電子がエミッタからシース（コレクタ）へ到達するために持たなければならない平均最小エネルギー、 $EMIN_s$ は電子がシース（コレクタ）からエミッタへ到達するために持たなければならない平均最小エネルギーである。ここで電子のエネルギーが $EMIN$ よりも低い場合は、その電子は放出元の極へ逆戻りし、電流には寄与しない。

この平均最小エネルギーを求めるためには、最大電位の位置 d_p を用いて、 $d_l - d_p$ 間の電子の平均飛程 \bar{R}_l 及び $d_s - d_p$ 間の電子の平均飛程 \bar{R}_s を以下の式から求め、電子がその区間を移動するのに要するエネルギーを飛程－エネルギーの関係式又は実験結果から算出する。

$$\bar{R}_l = \frac{d_p}{2} \left[E \left(\frac{d_l}{d_p} \right) - \frac{d_l}{d_p} \right], \quad \bar{R}_s = \frac{d_s}{2} \left[E \left(\frac{d_p}{d_s} \right) - \frac{d_p}{d_s} \right]$$

$$E(x) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - x^2 \sin^2 \theta} d\theta : \text{第二種完全楕円積分}$$

平均最小エネルギーは各種文献を参照することにより求められるが、Mahant らの論文⁴⁾では絶縁材が酸化アルミニウム (Al_2O_3) の場合の計算式が記されており、本稿でもこの式を用いることとする。

$$EMIN = 9442r_{avg}^3 - 6010r_{avg}^2 + 2906.75r_{avg} + 53.043$$

上式に含まれる文字の定義は以下の通りである。

$EMIN$: 平均最小エネルギーを表し、単位は[keV]である。

r_{avg} : 連続減速近似 (CSDA) における平均飛程を表し、単位は[$g \text{ cm}^{-2}$]である。

物質の密度を $\rho [g \text{ cm}^{-3}]$ 、平均飛程を $\bar{R} [cm]$ とした場合 $EMIN [keV]$ は次式で求められる。

$$EMIN = 9442(\rho \bar{R})^3 - 6010(\rho \bar{R})^2 + 2906.75(\rho \bar{R}) + 53.043$$

Al_2O_3 中における r_{avg} と $EMIN$ の関係は Fig.2.4 に示す通りである。

なお、具体的な計算例として、物質の密度を $3.0 [g \text{ cm}^{-3}]$ 、平均飛程を $0.05 [cm] (=0.5 [mm])$ とした場合の平均最小エネルギー $EMIN [keV]$ を計算すると以下の値を得る。

$$EMIN = 385.7 [keV]$$

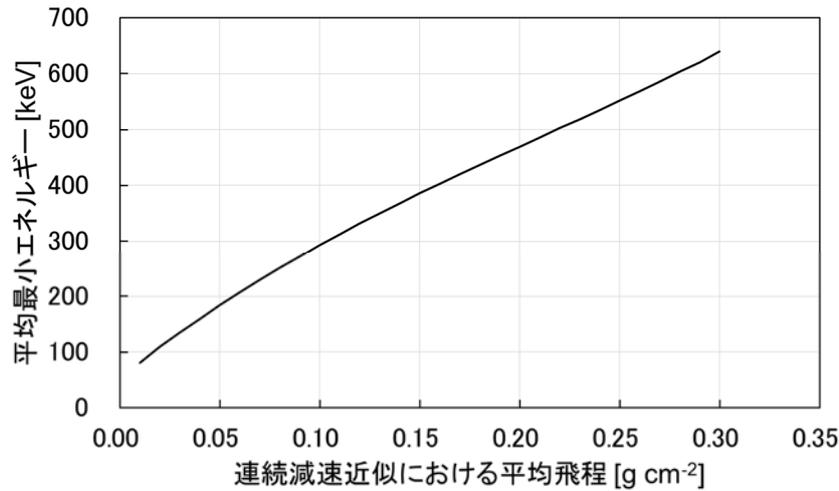


Fig.2.4 Al₂O₃ 中における電子エネルギーと飛程の関係

2.4 読込データの準備

計算に必要な読込データには以下の7種類がある。なお、括弧内はファイル名を示している。ガンマ線場のみの計算では必要となる読込データは「ガンマ線スペクトル」のみで、中性子場の場合は全ての読込データが必要となる。以降、各データ作成に関する注意事項を示す。

- ・ガンマ線スペクトル 「gamma-density.csv」
- ・中性子スペクトル 「neutron-density.csv」
- ・核異性体転移（内部転換）に関わる中性子捕獲断面積 「neutron-cross-section(I).csv」
- ・ベータ崩壊に関わる中性子捕獲断面積 「neutron-cross-section(B).csv」
- ・ガンマ崩壊に関わる中性子捕獲断面積 「neutron-cross-section(G).csv」
- ※即発ガンマ線に係る計算も含む。
- ・自己遮蔽係数 「self-shielding-factor.csv」
- ・中性子捕獲反応 (n,γ) により生じるガンマ線の数 「number-of-gamma.csv」

(1) ガンマ線スペクトル／中性子スペクトル

読込データはグラフにした時、横軸がガンマ線／中性子のエネルギー[keV]で縦軸がそのスペクトル[keV⁻¹ cm⁻² sec⁻¹]となるような2列の数値データが格納されたCSVファイルである。詳細は前著²⁾第3章3.3節「読み込む離散データの形式と参照方法」を参照のこと。また、格納されたデータは以下に示す規格化条件を満たしている必要がある。ここで、式中の $E_{i\max}$ は、放射線場におけるガンマ線／中性子の最大エネルギー、 $\phi(E_i)$ はエネルギーに対するスペクトルである。

$$\int_0^{E_{i\max}} \phi(E_i) dE_i = 1 \text{ [個 cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}\text{]}$$

(2) 核異性体転移（内部転換）／ベータ崩壊／ガンマ崩壊に関わる中性子捕獲断面積

読込データはグラフにした時、横軸が中性子のエネルギー[keV]で縦軸がその巨視的断面積[cm⁻¹]となるような 2 列の数値データが格納された CSV ファイルである。詳細は前著²⁾第 3 章 3.3 節「読み込む離散データの形式と参照方法」を参照のこと。

評価済核データライブラリ⁵⁾で公開されている中性子のエネルギーに対する断面積データ（微視的断面積）はポイントワイズデータで、単位は[barn](=[10⁻²⁴ cm²])である。中性子のエネルギーが区間E_i~E_{i+1} [eV]の範囲にある場合、その巨視的断面積は以下の計算を行うことにより近似的に求められる。ここで、次式中のσ,Σは各々、微視的断面積[barn]／巨視的断面積[cm⁻¹]、(E_{i+1} - E_i)はエネルギー区間の幅[eV]、ρは密度[g cm⁻³]、Aは原子量[g mol⁻¹]、N_Aはアボガドロ数[mol⁻¹]である。巨視的断面積データを得る具体的な方法を Fig.2.5 に示す。

$$\Sigma(E_n) = \int_{E_i}^{E_{i+1}} \sigma(E_n) dE_n \times \frac{\rho N_A}{A} = \sigma(E_n) \times (E_{i+1} - E_i) \times \frac{\rho N_A}{A}$$

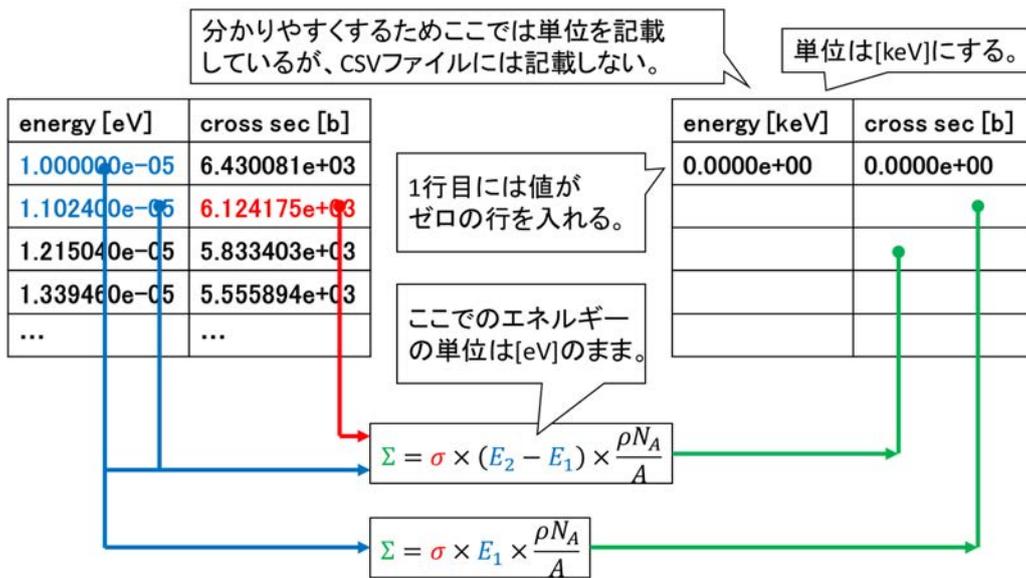


Fig.2.5 中性子捕獲断面積データの作成方法

(3) 自己遮蔽係数

読込データはグラフにした時、横軸が中性子のエネルギー[keV]で縦軸がその自己遮蔽係数（中性子のエネルギーに対する巨視的中性子吸収断面積を計算処理した値で、0 以上 1 以下の無次元の値）となるような 2 列の数値データが格納された CSV ファイルである。詳細は前著²⁾第 3 章 3.3 節「読み込む離散データの形式と参照方法」を参照のこと。自己遮蔽係数は以下の計算を行うことにより求められる^{6),7)}。

$$f = \frac{S}{4V\Sigma} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{4V\Sigma}{S}\right) \right\}$$

ここで、式中の Σ は巨視的中性子吸収断面積[cm⁻¹]、 V はエミッタの体積[cm³]、 S はエミッタの表面積[cm²]である。なお、 $\Sigma = 0$ の場合は $f = 1$ となる。

なお、エミッタの形状が直径 D [cm]、長さ L [cm]の円柱の場合、上式は次のように書き換えられる。自己遮蔽係数データを得る具体的な方法を Fig.2.6 に示す。

$$f = \frac{1}{D\Sigma} \{1 - \exp(-D\Sigma)\} \quad \ast \frac{S}{4V\Sigma} = \frac{\pi DL}{4\pi(D/2)^2 L \Sigma} = \frac{1}{D\Sigma}$$

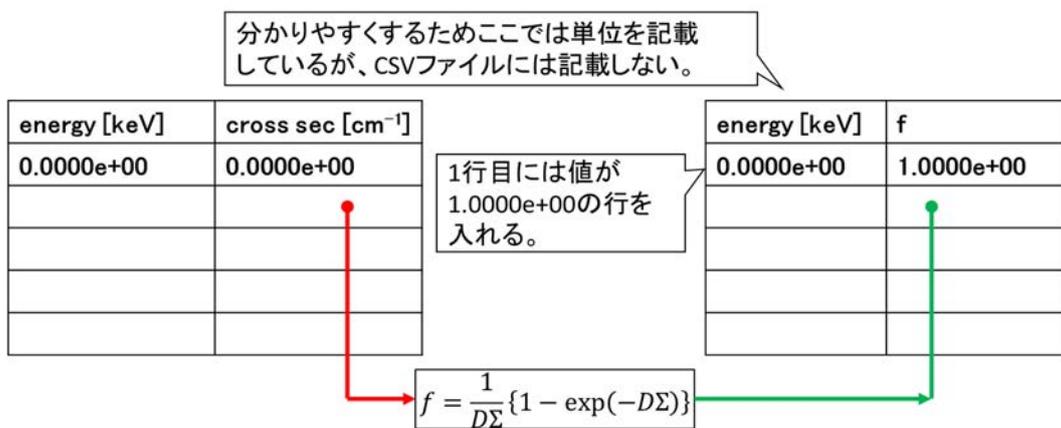


Fig.2.6 自己遮蔽係数データの作成方法

(4) 中性子捕獲反応(n,γ)により生じるガンマ線の数

読込データはガンマ線のエネルギー[keV]とその本数を 2 列の数値データとして格納した CSV ファイルである。このガンマ線のエネルギーと本数は Orphan らの研究成果⁸⁾を参照する。

3. ガンマ線照射試験結果と計算値の比較

本章では、QST 高崎研において実施されたコバルト 60 による SPGD のガンマ線照射試験の結果⁹⁾と本稿で用いた手法による計算値との比較を行う。

3.1 ガンマ線照射試験の概要

QST 高崎研のコバルト 60 線源ガンマ線照射施設コバルト 2 棟第 7 照射室において、Fig.3.1 に示すような試験体系を構築し、Table 3.1 に示す SPGD に対して照射試験を実施した。

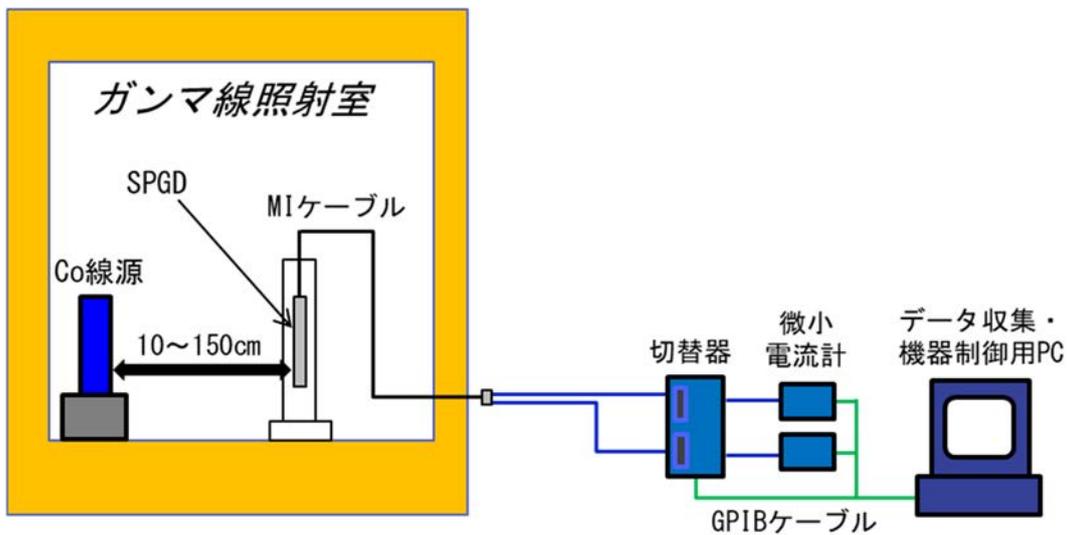


Fig.3.1 試験装置設置概略図

Table 3.1 SPGD の材質・寸法

エミッタ材質	鉛（純度 99.9%以上）（原子番号：82）		
シース材質	SUS316L（原子番号：26.17（加重平均））		
絶縁材	酸化アルミニウム（Al ₂ O ₃ ）		
絶縁材密度 ρ [g cm ⁻³]	3.017	3.601	3.879
エミッタ直径 d_l [mm]	2.0	3.0	5.0
エミッタ長さ L [mm]	100		
シース内径 d_s [mm]	2.9	3.9	5.9

3.2 読込データの準備と計算結果の整理

ガンマ線照射試験結果を評価するために必要な情報を以下に記す。

- ・ガンマ線の粒子フルエンス率 (Table 3.2 に示す。)

※算出方法は 2 章 2.1 節参照

- ・ガンマ線のスペクトル (Fig.3.2 にグラフ、付録に読込データの内容を示す。)

Table 3.2 ガンマ線照射場の線量率－粒子フルエンス率対応表

線源からの距離 [cm]	線量率 [kGy hour ⁻¹]	粒子フルエンス率 ×10 ¹¹ [個 cm ⁻² sec ⁻¹]
10	4.29/4.34	2.06/2.09
20	3.00/2.93	1.44/1.41
40	1.50/1.47	0.721/0.707
60	0.93/0.92	0.45/0.44
80	0.67	0.32
100	0.49	0.24
150	0.29	0.14

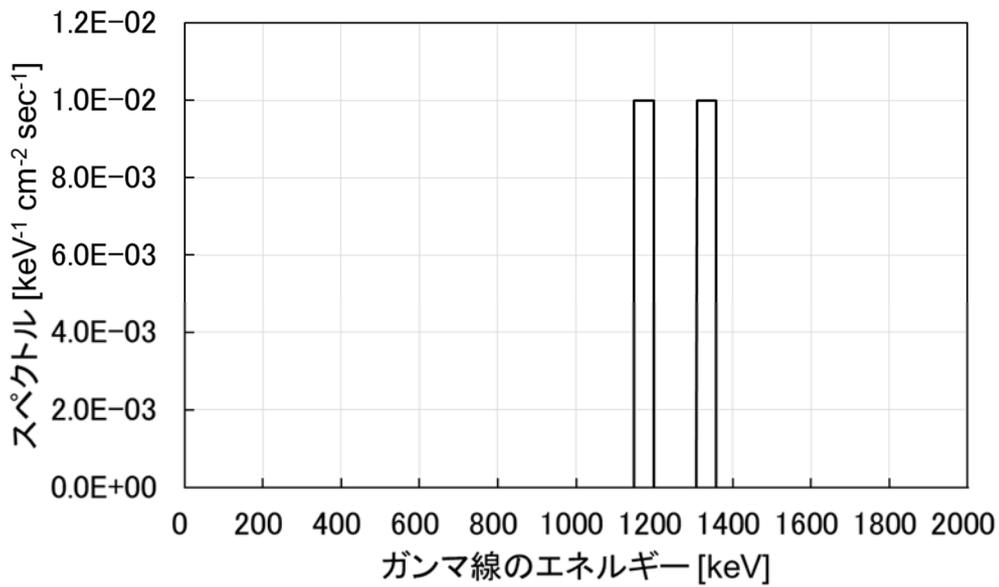


Fig.3.2 コバルト 60 線源のガンマ線スペクトル⁸⁾

- ・計算コードの実行に必要なパラメータ（原子量、密度、K殻の結合エネルギー等）
（Table 3.3 に示す）
 - ・計算コードの実行に必要なパラメータ（ $d_l, \bar{R}_l, EMIN_l$ 等）及び計算コードの出力結果
（ $T(E_\gamma, EMIN), D(E_\gamma, EMIN)$ ）（Table 3.4 に示す）
- ※算出方法は 2 章 2.3 節参照

Table 3.3 計算に係る数値の整理 (1)

材質	鉛 (エミッタ)	SUS316L (シース/コレクタ)
原子量 [g mol ⁻¹]	207.2	56.25 (加重平均)
直径/長さ [mm]	直径 3.0/長さ 100 (計算の都合上の仮の設定値) ※ $T(E_\gamma, EMIN), D(E_\gamma, EMIN)$ は大きさには依存しない。	
密度 [g cm ⁻³]	11.34	7.900 (加重平均)
原子番号	82	26.17 (加重平均)
K 殻電子の 結合エネルギー [keV]	91.45	9.409 (加重平均)
シンプソン法における 計算ステップ [keV]	1.0	

Table 3.4 計算に係る数値の整理 (2)

エミッタ直径 d_l [mm]	2.0	3.0	5.0
シース内径 d_s [mm]	2.9	3.9	5.9
最大電位の位置 d_p [mm]	2.430	3.436	5.441
エミッタ電子の 平均飛程 \bar{R}_l [mm]	0.5246	0.5669	0.6216
平均最小エネルギー $EMIN_l$ [keV]	400.0	476.3	536.9
$T(E_\gamma, EMIN_l)$	3.656×10^{-18}	2.955×10^{-18}	2.445×10^{-18}
$D(E_\gamma, EMIN_l)$	3.368×10^{-26}	3.022×10^{-26}	2.748×10^{-26}
シース/コレクタ電子の 平均飛程 \bar{R}_s [mm]	0.5837	0.6111	0.6515
平均最小エネルギー $EMIN_s$ [keV]	430.1	502.3	556.2
$T(E_\gamma, EMIN_s)$	3.372×10^{-18}	2.731×10^{-18}	2.291×10^{-18}
$D(E_\gamma, EMIN_s)$	3.603×10^{-26}	3.276×10^{-26}	3.032×10^{-26}
長さを 10 [cm]とした時の 光子 1 個当たりの電流 [A]	5.780×10^{-22}	8.211×10^{-22}	1.245×10^{-21}

3.3 結果の比較と考察

計算コードの出力結果及び実験値をまとめたものを Table 3.5～3.7 に、計算コード出力値と実験値を比較したグラフを Fig.3.3～3.5 に示す。なお、実験値については、計算コードとの比較検討のため、切片が原点となるようにオフセットをかけた。

各 SPGD とも、実験値及び計算値とも線量率と出力電流値は良い比例関係であった。エミッタ径が 2.0 及び 3.0 mm の場合は、計算値は実験値の 0.8～1.0 倍の範囲に収まり、計算は実験を良く再現した。一方、エミッタ径が 5.0 mm の場合は、計算値は系統的に実験値の 2 倍程度となり差異が大きかった。これは、計算値のほうが単位線量率に対する出力電流値、すなわち出力感度が高く見積もられたことを示している。

この要因として、ガンマ線及びコンプトン散乱電子のエミッタによる自己遮蔽効果が影響していることが考えられる。Co-60 線源からのガンマ線の平均エネルギーは 1.25MeV であり、生じるコンプトン散乱電子の最大エネルギーはおよそ 1MeV である。1MeV の電子の鉛中での飛程は約 0.35mm であるため（参考文献：10）、今回のように 2.0～5.0mm と 0.35mm 程度を大きく超える範囲で直径を太くしたとしても表面から 0.35mm 程度よりも深い位置で発生したコンプトン散乱電子はエミッタ自身により自己遮蔽されるため、表面付近で発生したコンプトン散乱電子しか出力電流に寄与し得ないことになる。また、コンプトン散乱電子の散乱方向は入射するガンマ線の方向を 0 度とすればほぼ 0～60 度に限られるため、今回のガンマ線場のように板状線源からの一方向に大きく偏ったガンマ線入射の場合、SPGD の出力に寄与するのは、ガンマ線入射方向と反対側に限った半周部分のエミッタ外縁部分が大部分を占めるはずである。この場合、曲率半径の大きいエミッタほど、エミッタ自身の自己遮蔽を逃れて出力に寄与するコンプトン散乱電子の割合が減少すると考えられる。これらの自己遮蔽効果により、エミッタ内に発生したコンプトン散乱電子のうち、エミッタ内で消滅して出力に寄与しないものの割合が直径を太くすることに応じて増加することが、出力感度低下の要因と考えられる。

したがって、自己出力型放射線検出器を適用するガンマ線環境下で想定されるコンプトン散乱電子のエミッタ中の飛程よりもエミッタ径が太い場合やガンマ線場が等方的でない場合に、本計算コードを用いて出力電流値をより正確に計算するためには、自己遮蔽による影響を電子の平均飛程や平均最小エネルギーの変化として採り入れる等の新たな定式化が必要であると考えられる。

Table 3.5 SPGD の出力電流の計算値

線量率 [kGy hour ⁻¹] /(粒子フルエンス率 ×10 ¹¹ [個 cm ⁻² sec ⁻¹])	エミッタ直径/長さ 2.0[mm]/100[mm] 出力電流×10 ⁻¹⁰ [A]	エミッタ直径/長さ 3.0[mm]/100[mm] 出力電流×10 ⁻¹⁰ [A]	エミッタ直径/長さ 5.0[mm]/100[mm] 出力電流×10 ⁻¹⁰ [A]
4.34/(2.09)	1.21	1.71	2.60
4.29/(2.06)	1.19	1.69	2.57
3.00/(1.44)	0.834	1.18	1.80
2.93/(1.41)	0.814	1.16	1.75
1.50/(0.721)	0.417	0.592	0.898
1.47/(0.707)	0.409	0.580	0.880
0.93/(0.45)	0.258	0.367	0.557
0.92/(0.44)	0.256	0.363	0.551
0.67/(0.32)	0.186	0.265	0.401
0.49/(0.24)	0.136	0.193	0.293
0.29/(0.14)	0.0806	0.115	0.174

Table 3.6 SPGD の出力電流の実験値

線量率 [kGy hour ⁻¹]	エミッタ直径/長さ 2.0[mm]/100[mm] 出力電流×10 ⁻¹⁰ [A]	エミッタ直径/長さ 3.0[mm]/100[mm] 出力電流×10 ⁻¹⁰ [A]	エミッタ直径/長さ 5.0[mm]/100[mm] 出力電流×10 ⁻¹⁰ [A]
4.34	—	1.84	—
4.29	1.49	1.86	1.35
3.00	1.03	—	0.885
2.93	—	1.24	—
1.50	0.546	—	0.453
1.47	—	0.615	—
0.93	0.324	—	0.285
0.92	—	0.387	—
0.67	0.224	0.267	0.208
0.49	0.168	0.215	0.159
0.29	0.0959	0.153	0.0987

※上記の表ではエミッタの直径毎の平均値を記しており、φ2 : No.3, No.4(1,2)、φ3 : No.9, No.10, No.11、φ5 : No.17, No.18 の結果を用いている。詳細は JAEA 報告書⁹⁾を参照。

Table 3.7 1光子により生じる電流の計算値

反応の種類	エミッタ直径/長さ 2.0[mm]/100[mm] 出力電流 [A]	エミッタ直径/長さ 3.0[mm]/100[mm] 出力電流 [A]	エミッタ直径/長さ 5.0[mm]/100[mm] 出力電流 [A]
コンプトン効果 (エミッタ側)	1.881×10^{-21}	2.280×10^{-21}	3.144×10^{-21}
光電効果 (エミッタ側)	7.834×10^{-22}	1.054×10^{-21}	1.598×10^{-21}
エミッタ側 合計電流	2.664×10^{-21}	3.335×10^{-21}	4.742×10^{-21}
コンプトン効果 (シース/コレクタ側)	2.076×10^{-21}	2.500×10^{-21}	3.476×10^{-21}
光電効果 (シース/コレクタ側)	1.041×10^{-23}	1.406×10^{-23}	2.158×10^{-23}
シース/コレクタ側 合計電流	2.086×10^{-21}	2.514×10^{-21}	3.497×10^{-21}
検出器正味の電流	5.780×10^{-22}	8.211×10^{-22}	1.245×10^{-21}

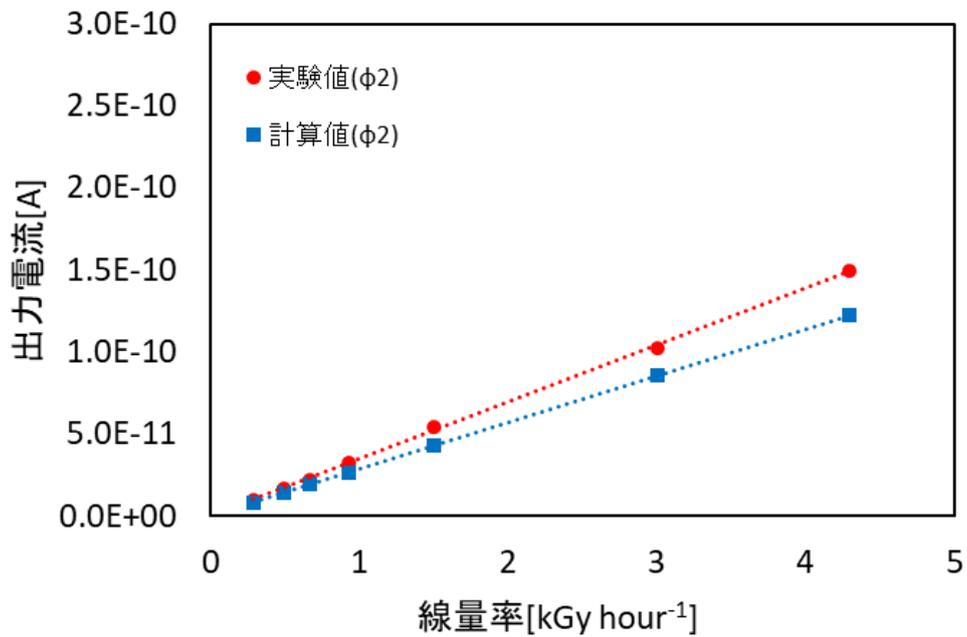


Fig.3.3 エミッタ直径 2.0[mm]/長さ 100[mm]の結果の比較

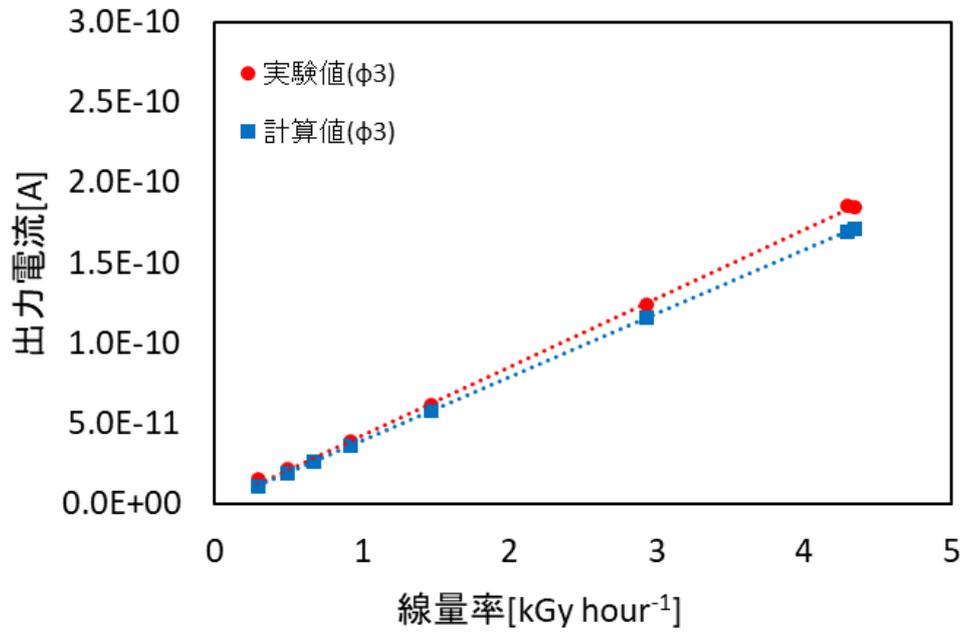


Fig.3.4 エミッタ直径 3.0[mm]／長さ 100[mm]の結果の比較

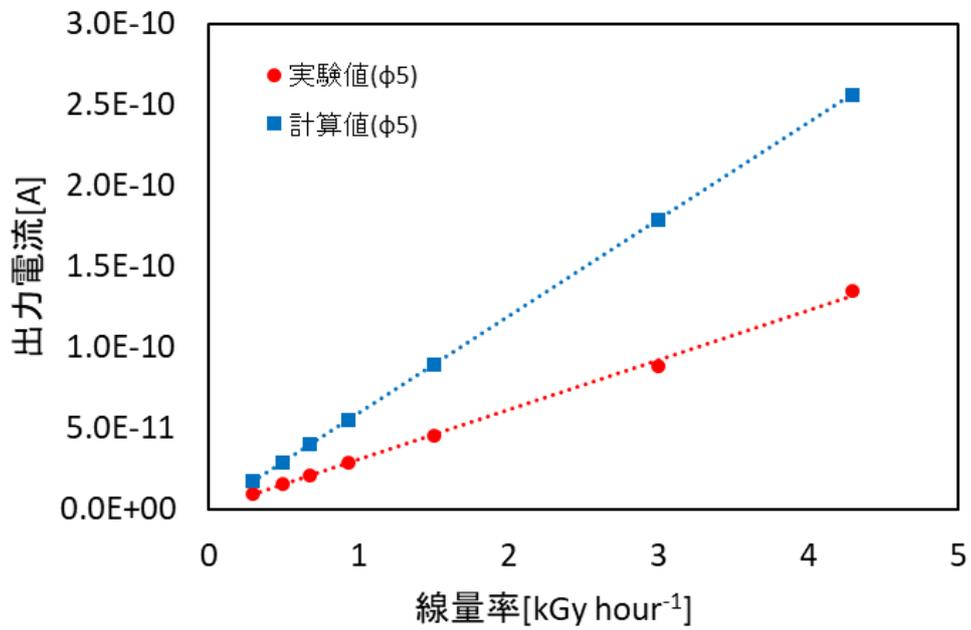


Fig.3.5 エミッタ直径 5.0[mm]／長さ 100[mm]の結果の比較

4. まとめ

本稿では、自己出力型放射線検出器の出力電流値に関してガンマ線環境下における試験結果と JAEA 報告書『自己出力型放射線検出器の出力電流値計算コードの作成(JAEA-Data/Code 2021-018)』において作成した計算コードによる理論的な出力結果の比較及び考察を行った。

その結果、ガンマ線によるコンプトン散乱電子の飛程に対して比較的エミッタ径が細かい場合には、計算結果は試験結果を良く再現することが分かった。一方、比較的エミッタ径が太い場合には計算結果と比較して試験結果における出力電流値は半分程度にとどまった。エミッタ径の違いによる差異が生じた要因としてエミッタによる自己遮蔽効果が考えられ、エミッタ径が太い場合やガンマ線場が等方的でない条件に由来する自己遮蔽による影響を、計算コードにおける電子の平均飛程や平均最小エネルギーの変化として採り入れる等の新たな定式化が必要であると思われる。

今後は中性子環境下における試験結果との比較及び考察も行い、自己出力型放射線検出器の出力計算手法のさらなる高度化を図ることで、適用する放射線場に応じたより最適な検出器の設計が可能となり得る。

謝辞

本稿の執筆に際して、大洗原子力工学研究所 環境技術開発部長 土谷邦彦氏、原子力科学研究所 研究基盤技術部 利用施設管理課長 中村 剛実氏には全体を通して丁寧かつ貴重なご指導をいただくとともに、原子力安全・防災研究所 安全研究センター 燃料安全研究グループ 中村 仁一氏には放射線環境下における材料の特性や数値計算に必要となるデータの準備に関して貴重なご助言をいただき、原子力人材育成センター 原子力研修課 松田規宏氏には断面積データベースの利用方法に関しご協力をいただきました。また、大洗原子力工学研究所 環境技術開発部 廃止措置推進課の皆様にも多大なご協力をいただきました。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) H.D.Warren and N.H.Shah, “Neutron and Gamma-Ray Effects on Self-Powered In-Core Radiation Detectors”, Nuclear Science and Engineering, vol.54, no.4, 1974, pp.395-415.
- 2) 柴田裕司, 武内伴照他, 「自己出力型放射線検出器の出力電流値計算コードの作成」, JAEA-Data/Code 2021-018, 2022, 42p.
- 3) 柴田徳思 編, 「放射線概論 第8版」, 通商産業研究社, ISBN978-4-86045-108-0, 2012, 859p.
- 4) A.K.Mahant, P.S.Rao, S.C.Misra, “Composite space charge density functions for the calculation of gamma sensitivity of self-powered neutron detectors, using Warren’s model”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 346, 1994, pp.279-285.
- 5) 日本原子力研究開発機構核データ研究グループ, 「評価済核データライブラリ」, https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/Jendl_J.html (参照: 2024年9月2日).
- 6) 中村治人, 山林尚道, 「RI製造における中性子自己遮蔽効果の評価」, 日本原子力学会誌, vol.12, no.1, 1969, pp.2-6.
- 7) Robert G. Nisle, “Neutron-Absorption Alignment Chart”, Nucleonics, vol.18, no.3, 1960, p.86.
- 8) V. J. Orphan, N. C. Rasmussen, T. L. Harper, “Line and Continuum Gamma-Ray Yields from Thermal-Neutron Capture in 75 Elements”, Gulf Energy & Environmental Systems, DASA2570, 1970, 680p.
- 9) 柴田晃, 武内伴照他, 「鉛エミッタを用いた自己出力型 γ 線検出器(SPGD)の開発」, JAEA-Technology 2013-043, 2014, 24p.
- 10) L. Katz and A. S. Penfold, “Range-Energy Relation for Electrons and the Determination of β -ray and Endpoint Energies by Absorption”, Reviews of Modern Physics, vol.24, 1952, pp.24-28.

付録

第2章 「試験結果の評価に係る理論的準備」に係る補足事項

(1) 各電荷密度分布に対する電位の一般式の導出

電荷密度分布 $\rho(r)$ を $A_n r^n$ ($n \geq 1$)とおき、ポアソン方程式を解く。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{dV_n(r)}{dr} \right\} = -\frac{A_n}{\varepsilon} r^n \quad \rightarrow \quad V_n(r) = -\frac{A_n r^{n+2}}{\varepsilon(n+2)^2} + C_1 \ln r + C_2$$

以下の境界条件を用いて積分定数 C_1, C_2 を求める。

$$V_n(r_l) = -\frac{A_n r_l^{n+2}}{\varepsilon(n+2)^2} + C_1 \ln r_l + C_2 = 0, \quad V_n(r_s) = -\frac{A_n r_s^{n+2}}{\varepsilon(n+2)^2} + C_1 \ln r_s + C_2 = 0$$

境界条件から積分定数は次のように表される。

$$C_1 = \frac{A_n}{\varepsilon(n+2)^2} \frac{r_l^{n+2} - r_s^{n+2}}{\ln r_l - \ln r_s}, \quad C_2 = \frac{A_n}{\varepsilon(n+2)^2} \frac{r_s^{n+2} \ln r_l - r_l^{n+2} \ln r_s}{\ln r_l - \ln r_s}$$

これらから電位の式を整理すると次のようになる。

$$V_n(r) = \frac{A_n}{\varepsilon(n+2)^2} \left\{ -r^{n+2} + \frac{r_s^{n+2} \ln(r/r_l) + r_l^{n+2} \ln(r_s/r)}{\ln(r_s/r_l)} \right\}$$

また、 $k = r_l/r_s$ を用いると次のように書き換えることができる。

$$V_n(r) = \frac{A_n r_s^{n+2}}{\varepsilon(n+2)^2} \left\{ -\left(\frac{r}{r_s}\right)^{n+2} + \frac{\ln(r/r_l) + k^{n+2} \ln(r_s/r)}{\ln(1/k)} \right\}$$

次に電荷密度分布 $\rho(r)$ が $A_{-2} r^{-2}$ の場合の電位の式を求める。

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{dV_{-2}(r)}{dr} \right\} = -\frac{A_{-2}}{\varepsilon} r^{-2} \quad \rightarrow \quad V_{-2}(r) = -\frac{A_{-2}}{2\varepsilon} (\ln r)^2 + C_1 \ln r + C_2$$

以下の境界条件を用いて積分定数 C_1, C_2 を求める。

$$V_{-2}(r_l) = -\frac{A_{-2}}{2\varepsilon} (\ln r_l)^2 + C_1 \ln r_l + C_2 = 0, \quad V_{-2}(r_s) = -\frac{A_{-2}}{2\varepsilon} (\ln r_s)^2 + C_1 \ln r_s + C_2 = 0$$

境界条件から積分定数は次のように表される。

$$C_1 = \frac{A_{-2}}{2\varepsilon} \ln r_l r_s, \quad C_2 = -\frac{A_{-2}}{2\varepsilon} \ln r_l \ln r_s$$

これらから電位の式を整理すると次のようになる。

$$V_{-2}(r) = \frac{A_{-2}}{2\varepsilon} \ln \frac{r}{r_l} \ln \frac{r_s}{r}$$

以上からまとめると電位の式は次のようになる。

$$\rho(r) = A_n r^n \Leftrightarrow V_n(r) = \begin{cases} \frac{A_{-2}}{2\varepsilon} \ln \frac{r}{r_l} \ln \frac{r_s}{r} & (n = -2) \\ \frac{A_n r_s^{n+2}}{\varepsilon(n+2)^2} \left\{ -\left(\frac{r}{r_s}\right)^{n+2} + \frac{\ln(r/r_l) + k^{n+2} \ln(r_s/r)}{\ln(1/k)} \right\} & (n \geq -1) \end{cases}$$

(2) 各電位が最大となる位置の導出

電位が最大となる位置 r_p では $dV(r_p)/dr = 0$ となるので、(1) で整理した電位の式を用いてこの位置を求める。始めに各電位の式を微分すると次のようになる。

$$\rho(r) = A_n r^n \Leftrightarrow \frac{dV_n(r)}{dr} = \begin{cases} \frac{A_{-2}}{\varepsilon r} \{ \ln(r_s \sqrt{k}) - \ln r \} & (n = -2) \\ \frac{A_n}{\varepsilon(n+2)^2} \left\{ -(n+2)r^{n+1} + \left(\frac{r_s^{n+2}}{r} \right) \frac{1-k^{n+2}}{\ln(1/k)} \right\} & (n \geq -1) \end{cases}$$

上記の式で各々がゼロとなる位置 $r_{p(n)}$ は次のように表される。

$$\rho(r) = A_n r^n \Leftrightarrow r_{p(n)} = \begin{cases} r_s \sqrt{k} & (n = -2) \\ r_s \left\{ \frac{1-k^{n+2}}{(n+2)\ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{n+2}} & (n \geq -1) \end{cases}$$

電位について、重ね合わせの原理と微分の線形性から数学的・物理的に正しい r_p は次式を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \sum_{i=-2}^N \frac{dV_i(r)}{dr} &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{1}{\varepsilon r} \left\{ A_{-2} \ln(r_s \sqrt{k}) + \frac{1}{\ln(1/k)} \sum_{i=-1}^N \frac{A_i r_s^{i+2} (1-k^{i+2})}{(i+2)^2} \right\} - \frac{1}{\varepsilon r} \left\{ A_{-2} \ln r + \sum_{i=-1}^N \frac{A_i r^{i+2}}{(i+2)} \right\} &= 0 \\ \Leftrightarrow A_{-2} \ln(r_s \sqrt{k}) + \frac{1}{\ln(1/k)} \sum_{i=-1}^N \frac{A_i r_s^{i+2} (1-k^{i+2})}{(i+2)^2} &= A_{-2} \ln r + \sum_{i=-1}^N \frac{A_i r^{i+2}}{(i+2)} \end{aligned}$$

具体的に $N = 2$ として方程式を書き出すと次のようになる。

$$\begin{aligned} A_{-2} \ln r + \frac{A_{-1} r^1}{1} + \frac{A_0 r^2}{2} + \frac{A_1 r^3}{3} + \frac{A_2 r^4}{4} &= A_{-2} \ln(r_s \sqrt{k}) \\ + \frac{1}{\ln(1/k)} \left\{ \frac{A_{-1} r_s^1 (1-k^1)}{1^2} + \frac{A_0 r_s^2 (1-k^2)}{2^2} + \frac{A_1 r_s^3 (1-k^3)}{3^2} + \frac{A_2 r_s^4 (1-k^4)}{4^2} \right\} & \end{aligned}$$

この方程式を解くにはニュートン法等の数値計算法を用いるしかないが、論文では厳密な解を求めるのではなく、前述の $r_{p(n)}$ に重み付けしたものを最大電位の位置として扱っている。

(3) 対応表

以下に電荷密度分布と対応する最大電位の位置を示す。

電荷密度分布と対応する最大電位の位置

n	$\rho(r)$	$r_{p(n)}$
-2	$A_{-2}r^{-2}$	$r_s\sqrt{k}$
-1	$A_{-1}r^{-1}$	$r_s \left\{ \frac{1-k^1}{1\ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{1}}$
0	$A_0r^0 (= A_0)$	$r_s \left\{ \frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{2}}$
1	A_1r^1	$r_s \left\{ \frac{1-k^3}{3\ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{3}}$
2	A_2r^2	$r_s \left\{ \frac{1-k^4}{4\ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{4}}$

(4-1) チェックリスト (最大電位の位置及び電子の平均最小エネルギーの算出)

1. 寸法・原子番号

エミッタ外径 (直径) d_l [cm] : _____

シース/コレクタ内径 (直径) d_s [cm] : _____

エミッタ 原子番号 Z_l : _____

シース/コレクタ原子番号 Z_s : _____

$k = d_l/d_s =$ _____ $Z_0 = Z_s/Z_l =$ _____

2. 最大電位の位置

($Z_l > Z_s$)

$$r_p = \frac{Z_0^4 r_{p(-2)} + Z_0 r_{p(-1)} + Z_0^2 r_{p(0)} + Z_0^2 r_{p(1)}}{Z_0^4 + Z_0 + Z_0^2 + Z_0^2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

($Z_l < Z_s$)

$$r_p = \frac{Z_0^2 r_{p(1)} + Z_0^5 r_{p(2)}}{Z_0^2 + Z_0^5} = \underline{\hspace{2cm}}$$

添字と電位の位置に関する関数の対応

n	-2	-1	0	1	2
$r_{p(n)}$	$r_s \sqrt{k}$	$r_s \left\{ \frac{1-k^1}{1 \ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{1}}$	$r_s \left\{ \frac{1-k^2}{2 \ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{2}}$	$r_s \left\{ \frac{1-k^3}{3 \ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{3}}$	$r_s \left\{ \frac{1-k^4}{4 \ln(1/k)} \right\}^{\frac{1}{4}}$
計算値	_____	_____	_____	_____	_____

3. 平均飛程

$d_p = 2r_p =$ _____

$E\left(\frac{d_l}{d_p}\right) =$ _____ $\bar{R}_l = \frac{d_p}{2} \left[E\left(\frac{d_l}{d_p}\right) - \frac{d_l}{d_p} \right] =$ _____

$E\left(\frac{d_p}{d_s}\right) =$ _____ $\bar{R}_s = \frac{d_s}{2} \left[E\left(\frac{d_p}{d_s}\right) - \frac{d_p}{d_s} \right] =$ _____

4. 平均最小エネルギーの算出

絶縁材 ρ [g cm⁻³] : _____

$EMIN_l =$ _____ $EMIN_s =$ _____

※ $EMIN = 9442(\rho \bar{R})^3 - 6010(\rho \bar{R})^2 + 2906.75(\rho \bar{R}) + 53.043$

(4-2) チェックリスト (数値計算の準備 1/2)

数値計算の準備 (コード内のパラメータ設定)

項目	変数名	説明・確認事項	関係する 反応	確認欄
原子量 [g mol ⁻¹]	gA		全ての 反応	
エミッタの直径 [cm]	gD			
エミッタの長さ [cm]	gL			
エミッタの密度 [g cm ⁻³]	gP			
原子番号	gZ			
エミッタの密度と 線阻止能の逆数の積 [g cm ⁻² keV ⁻¹]	gK	通常 6.5×10^{-4} [g cm ⁻² keV ⁻¹] で変更の必要は 無い		
電流発生に寄与する ガンマ線の最小 エネルギー [keV]	bEMIN	チェックリスト (最大電位の位置及び電子の 平均最小エネルギーの算出) を用いて計算		
K 殻の結合エネルギー [keV]	gEk		(n-IT) (γ -P) (n- γ -P)	
エミッタ表面までの 平均飛程 [cm]	gAL	エミッタが十分細かい場合 : 2/3 × (エミッタの直径) 中性子捕獲断面積が大きい場合 : 1/2 × (エミッタの直径)	(n- γ -C) (n- γ -P)	
エネルギーの計算 ステップサイズ [keV]	bDEg	通常 1.0 [keV] で変更の必要は無い	(γ -C)	
K 殻の内部転換係数	bETk		(n-IT)	
全殻の内部転換係数	bETt			
核異性体転移に よるガンマ線の エネルギー [keV]	bEit			
ベータ崩壊による ベータ線の エネルギー [keV]	bEb		(n- β)	

(4-3) チェックリスト (数値計算の準備 2/2)

数値計算の準備 (読込データファイルの準備)

項目	変数名	説明・確認事項	関係する 反応	確認欄
ガンマ線の粒子フルエ ンス率 [$\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$]	—	実際の発生電流の計算において必要	(γ -C) (γ -P)	
中性子線の粒子フルエ ンス率 [$\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$]	—	実際の発生電流の計算において必要	(n-IT) (n- β) (n- γ -C) (n- γ -P)	
ガンマ線の スペクトルデータ	pgx[] pgy[]	・ファイル名 : gamma-density.csv ・エネルギーの単位は[keV] ・データは規格化済(積分値=1)	(γ -C) (γ -P)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
中性子線の スペクトルデータ	pnx[] pny[]	・ファイル名 : neutron-density.csv ・エネルギーの単位は[keV] ・データは規格化済(積分値=1)	(n-IT) (n- β) (n- γ -C)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
自己遮蔽係数のデータ	ffx[] ffyy[]	・ファイル名 : self-shielding-factor.csv ・巨視的中性子捕獲断面積を用いて計算済	(n- γ -P)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
中性子捕獲反応におけ るガンマ線のエネルギー とその本数データ	mmx[] mmy[]	・ファイル名 : number-of-gamma.csv ・エネルギーの単位は[keV] ・中性子1個当りデータに換算済	(n- γ -C) (n- γ -P)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
核異性体転移の 断面積データ	six[] siy[]	・ファイル名 : neutron-cross-section(I).csv ・エネルギーの単位は[keV] ・巨視的断面積で単位は[cm^{-1}]	(n-IT)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
ベータ崩壊の 断面積データ	sbx[] sby[]	・ファイル名 : neutron-cross-section(B).csv ・エネルギーの単位は[keV] ・巨視的断面積で単位は[cm^{-1}]	(n- β)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
ガンマ崩壊の 断面積データ	sgx[] sgy[]	・ファイル名 : neutron-cross-section(G).csv ・エネルギーの単位は[keV] ・巨視的断面積で単位は[cm^{-1}]	(n- γ -C) (n- γ -P)	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

第3章 「ガンマ線照射試験結果と計算値の比較」に係るログファイル

```

                                     エミッタ側ログファイル
=====
=== program start (main) ===
+-----+
|           Numerical Calculation Program           |
|           for Self-Powered Radiation Detector       |
|           Version 1.0 (2021/12/01)                 |
+-----+

=== initialization start      (init_setting) ===
=== initialization completion (init_setting) ===

=== setting view start      (setting_view) ===
gram atomic weight (A)           : 2.0720e+002 (g mol-1)
cylindrical diameter (d)        : 3.0000e-001 (cm)
cylindrical length (L)         : 1.0000e+001 (cm)
surface area of material (S)    : 9.4248e+000 (cm2)
density of absorber (rho)       : 1.1340e+001 (g cm-3)
atomic number, number of electrons per atom (Z) : 8.2000e+001
number of atoms per unit volume (N) : 3.2959e+022 (cm-3)
density times inverse of specific energy loss (K) : 6.5000e-004 (g cm-2 keV-1)
=== setting view completion (setting_view) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening succeed [gamma-density.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-density.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [self-shielding-factor.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===

```

エミッタ側ログファイル

```

file opening failure [number-of-gamma.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-cross-section(I).csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-cross-section(B).csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-cross-section(G).csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== calculation of neutron capture rate start      (Rn_calc) ===
data of neutron-density is nothing
=== calculation of neutron capture rate discontinuation (Rn_calc) ===

=== single interactions (compton electron) start      (SI_GC) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
minimum gamma energy (E_l (EMIN)) : 5.7709e+002 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 4.0000e+002 (keV)
current (I_gamma,compton) : 2.8212e-021 (A)
current (I_gamma,compton) (1cm) : 2.8212e-022 (A)
T(E_gamma,EMIN) (1cm) : 3.6557e-018
dE_gamma : 1.0000e+000 (keV)
=== single interactions (compton electron) completion (SI_GC) ===

=== single interactions (photoelectron) start      (SI_GP) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
K-shell electron binding energy (E_K) : 9.1450e+001 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 4.0000e+002 (keV)
current (I_gamma,photoelectron) : 1.1751e-021 (A)
current (I_gamma,photoelectron) (1cm) : 1.1751e-022 (A)
D(E_gamma,EMIN) (1cm) : 3.3678e-026

```

エミッタ側ログファイル

```

=== single interactions (photoelectron) completion      (SI_GP) ===

=== single interactions (compton electron) start        (SI_GC) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
minimum gamma energy (E_l(EMIN))   : 6.6054e+002 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 4.7630e+002 (keV)
current (I_gamma,compton)           : 2.2803e-021 (A)
current (I_gamma,compton) (1cm)     : 2.2803e-022 (A)
T(E_gamma,EMIN) (1cm)               : 2.9548e-018
dE_gamma                             : 1.0000e+000 (keV)
=== single interactions (compton electron) completion (SI_GC) ===

=== single interactions (photoelectron) start          (SI_GP) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
K-shell electron binding energy (E_K) : 9.1450e+001 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 4.7630e+002 (keV)
current (I_gamma,photoelectron)      : 1.0544e-021 (A)
current (I_gamma,photoelectron) (1cm) : 1.0544e-022 (A)
D(E_gamma,EMIN) (1cm)                : 3.0221e-026
=== single interactions (photoelectron) completion      (SI_GP) ===

=== single interactions (compton electron) start        (SI_GC) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
minimum gamma energy (E_l(EMIN))   : 7.2588e+002 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 5.3690e+002 (keV)
current (I_gamma,compton)           : 1.8864e-021 (A)
current (I_gamma,compton) (1cm)     : 1.8864e-022 (A)
T(E_gamma,EMIN) (1cm)               : 2.4445e-018
dE_gamma                             : 1.0000e+000 (keV)
=== single interactions (compton electron) completion (SI_GC) ===

=== single interactions (photoelectron) start          (SI_GP) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
K-shell electron binding energy (E_K) : 9.1450e+001 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 5.3690e+002 (keV)
current (I_gamma,photoelectron)      : 9.5865e-022 (A)

```

```

エミッタ側ログファイル
current (I_gamma,photoelectron) (1cm) : 9.5865e-023 (A)
D(E_gamma,EMIN) (1cm) : 2.7476e-026
=== single interactions (photoelectron) completion (SI_GP) ===

=== single interactions (internal conversion) start (SI_NI) ===
Rni error
=== calculation of internal conversion discontinuation (SI_NI) ===

=== single interactions (beta decay) start (SI_NB) ===
beta decay energy error or Rnb error
=== calculation of beta decay discontinuation (SI_NB) ===

=== two interactions (compton electron) start (TI_NC) ===
nmm error or Rng error
=== calculation of neutron-compton electron discontinuation (TI_NC) ===

=== two interactions (photoelectron) start (TI_NP) ===
nmm error or Rng error
=== calculation of neutron-photoelectron discontinuation (TI_NP) ===

=== file writing start (file_writer) ===
=== file writing completion (file_writer) ===

=== program completion (main) ===

```

```

シース/コレクタ側ログファイル
=== program start (main) ===
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|           Numerical Calculation Program           |
|           for Self-Powered Radiation Detector       |
|           Version 1.0 (2021/12/01)                 |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
=== initialization start (init_setting) ===
=== initialization completion (init_setting) ===

```

シース/コレクタ側ログファイル

```

=== setting view start      (setting_view) ===
gram atomic weight (A)      : 5.6250e+001 (g mol-1)
cylindrical diameter (d)    : 3.0000e-001 (cm)
cylindrical length (L)     : 1.0000e+001 (cm)
surface area of material (S) : 9.4248e+000 (cm2)
density of absorber (rho)   : 7.9000e+000 (g cm-3)
atomic number, number of electrons per atom (Z) : 2.6170e+001
number of atoms per unit volume (N) : 8.4578e+022 (cm-3)
density times inverse of specific energy loss (K) : 6.5000e-004 (g cm-2 keV-1)
=== setting view completion (setting_view) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening succeed [gamma-density.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-density.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [self-shielding-factor.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [number-of-gamma.csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-cross-section(I).csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-cross-section(B).csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

```

シース/コレクタ側ログファイル

```

=== file reading start      (file_reader) ===
file opening failure [neutron-cross-section(G).csv]
=== file reading completion (file_reader) ===

=== calculation of neutron capture rate start      (Rn_calc) ===
data of neutron-density is nothing
=== calculation of neutron capture rate discontinuation (Rn_calc) ===

=== single interactions (compton electron) start      (SI_GC) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max)   : 1.3575e+003 (keV)
minimum gamma energy (E_l(EMIN))     : 6.1019e+002 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 4.3010e+002 (keV)
current (I_gamma,compton)             : 3.0587e-021 (A)
current (I_gamma,compton) (1cm)      : 3.0587e-022 (A)
T(E_gamma,EMIN) (1cm)                : 3.3715e-018
dE_gamma                              : 1.0000e+000 (keV)
=== single interactions (compton electron) completion (SI_GC) ===

=== single interactions (photoelectron) start      (SI_GP) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max)   : 1.3575e+003 (keV)
K-shell electron binding energy (E_K) : 9.4090e+000 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 4.3010e+002 (keV)
current (I_gamma,photoelectron)      : 1.5332e-023 (A)
current (I_gamma,photoelectron) (1cm) : 1.5332e-024 (A)
D(E_gamma,EMIN) (1cm)               : 3.6031e-026
=== single interactions (photoelectron) completion (SI_GP) ===

=== single interactions (compton electron) start      (SI_GC) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max)   : 1.3575e+003 (keV)
minimum gamma energy (E_l(EMIN))     : 6.8866e+002 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 5.0230e+002 (keV)
current (I_gamma,compton)             : 2.4775e-021 (A)
current (I_gamma,compton) (1cm)      : 2.4775e-022 (A)
T(E_gamma,EMIN) (1cm)                : 2.7308e-018
dE_gamma                              : 1.0000e+000 (keV)
=== single interactions (compton electron) completion (SI_GC) ===

```

ソース/コレクタ側ログファイル

```

=== single interactions (photoelectron) start      (SI_GP) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
K-shell electron binding energy (E_K) : 9.4090e+000 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 5.0230e+002 (keV)
current (I_gamma,photoelectron)      : 1.3940e-023 (A)
current (I_gamma,photoelectron) (1cm) : 1.3940e-024 (A)
D(E_gamma,EMIN) (1cm)                : 3.2760e-026
=== single interactions (photoelectron) completion (SI_GP) ===

=== single interactions (compton electron) start   (SI_GC) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
minimum gamma energy (E_l(EMIN))    : 7.4655e+002 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 5.5620e+002 (keV)
current (I_gamma,compton)            : 2.0781e-021 (A)
current (I_gamma,compton) (1cm)      : 2.0781e-022 (A)
T(E_gamma,EMIN) (1cm)               : 2.2906e-018
dE_gamma                             : 1.0000e+000 (keV)
=== single interactions (compton electron) completion (SI_GC) ===

=== single interactions (photoelectron) start      (SI_GP) ===
maximum energy of gamma-ray (E_max) : 1.3575e+003 (keV)
K-shell electron binding energy (E_K) : 9.4090e+000 (keV)
average minimum kinetic energy (EMIN) : 5.5620e+002 (keV)
current (I_gamma,photoelectron)      : 1.2901e-023 (A)
current (I_gamma,photoelectron) (1cm) : 1.2901e-024 (A)
D(E_gamma,EMIN) (1cm)                : 3.0318e-026
=== single interactions (photoelectron) completion (SI_GP) ===

=== single interactions (internal conversion) start (SI_NI) ===
Rni error
=== calculation of internal conversion discontinuation (SI_NI) ===

=== single interactions (beta decay) start         (SI_NB) ===
beta decay energy error or Rnb error
=== calculation of beta decay discontinuation      (SI_NB) ===

```

ソース/コレクタ側ログファイル

```
=== two interactions (compton electron) start          (TI_NC) ===  
nmm error or Rng error  
=== calculation of neutron-compton electron discontinuation (TI_NC) ===  
  
=== two interactions (photoelectron) start            (TI_NP) ===  
nmm error or Rng error  
=== calculation of neutron-photoelectron discontinuation (TI_NP) ===  
  
=== file writing start      (file_writer) ===  
=== file writing completion (file_writer) ===  
  
=== program completion (main) ===
```

This is a blank page.

