

反転薄型シリコンダイオードを用いた
リアルタイム中性子個人被ばく線量計の開発

防衛大学校理工学研究科後期課程

物質・基礎科学系 応用・基礎物理学

阿部 洋平

令和4年3月

目次

1. 序論	1
1.1. 放射線被ばくの現状	1
1.2. 被ばく線量評価	3
1.2.1. 防護量(実効線量)	3
1.2.2. 実用量(線量当量)	4
1.3. 中性子の分類	7
1.4. 個人被ばく線量計	8
1.4.1. 受動型個人被ばく線量計	8
1.4.2. 能動型個人被ばく線量計	8
1.4.3. シリコン半導体の放射線検出原理	10
1.4.4. 富士電機(株)製リアルタイム中性子個人被ばく線量計	12
1.5. 中性子個人被ばく線量計の問題点	14
1.5.1. 全体概要	14
1.5.2. 速中性子センサー	15
1.5.3. 熱中性子センサー	16
1.6. 本研究の目的	17
2. 新型中性子センサー	18
2.1. 反転薄型シリコンダイオード	18
2.2. 新型速中性子センサー	20
2.2.1. 新型速中性子センサーの概要	20
2.3. 新型熱中性子センサー	21
2.3.1. 新型熱中性子センサーの概要	21
2.3.2. 熱中性子ラジエータ製作	22
2.3.3. 熱中性子ラジエータの膜厚測定	23
3. 新型速中性子センサーの応答特性評価	26
3.1. 評価方法	26
3.1.1. ガンマ線感度	26
3.1.1.1. 測定回路	26
3.1.1.2. エネルギー校正	27
3.1.1.3. ガンマ線照射	29
3.1.2. 中性子照射実験	30
3.1.2.1. 加速器による単色中性子照射	30
3.1.2.2. 中性子線源照射	32
3.1.3. モンテカルロシミュレーション	33
3.2. 結果と考察	34

3.2.1. ガンマ線感度	34
3.2.2. 中性子照射実験による評価	36
3.2.3. モンテカルロシミュレーションによる評価	42
3.2.4. 1cm 線量当量換算係数に対する評価	47
3.2.4.1. 1cm 線量当量換算係数との比較	47
3.2.4.2. 上限ディスクリの追加検討	48
4. 新型熱中性子センサーの構造設計	50
4.1. 検出効率の中性子入射角度依存性	50
4.1.1. 角度依存性の評価方法	50
4.1.2. 角度依存性の評価結果	53
4.2. 新型熱中性子センサー構造の決定	56
4.3. 新型熱中性子センサー構造の評価	57
5. 新型熱中性子センサーの応答特性評価	59
5.1. 評価方法	60
5.1.1. 中性子照射実験による評価	60
5.1.1.1. 黒鉛パイル場による熱中性子照射	60
5.1.1.2. 加速器による単色中性子照射	62
5.1.2. モンテカルロシミュレーションによる評価	64
5.2. 結果と考察	66
5.2.1. 中性子照射実験による評価	66
5.2.2. モンテカルロシミュレーションによる評価	70
6. リアルタイム個人被ばく線量計への展開	72
6.1. 中性子エネルギー応答特性	72
6.2. 1cm 線量当量評価	76
7. まとめ	79
謝辞	81
参考文献	82
研究業績	85

1. 序論

1.1. 放射線被ばくの現状

放射線や放射性物質は原子力発電所などのエネルギー分野を始め、医療、産業など幅広い分野で利用されている。放射線を使用する事業者数及び申請者数は、国への使用許可と届出事業所数の年度推移として報告されている [1]。放射線を何らかの形で利用している事業所は、年々増加し、その数は 2019 年度において日本国内で 8000 事業所に及ぶ。

エネルギー分野では、核分裂反応を用いた原子力発電における利用が代表例である。原子力発電は二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギー発電方法であり、地球温暖化防止の観点から二酸化炭素排出削減が世界的に望まれている。原子力発電所で発生した使用済核燃料からウラン、プルトニウムを回収し、核燃料として再利用する核燃料サイクル [2]も国策として取組まれている。東日本大震災後、多くの原子力発電所が停止しているが、2021 年に閣議決定された「エネルギー基本計画」に基づき、安全を最優先し、地元住民の理解を得ながら再稼働に向けて準備している。

医療分野では、レントゲン検査、PET(Positron Emission Tomography、陽電子放出断層撮影)、CT(Computed Tomography、コンピュータ断層撮影)、SPECT(Single Photon Emission Computed Tomography、単一光子放射型コンピュータ断層撮影)などの放射線診断、エックス線、ガンマ線、電子線を用いた放射線治療や、重粒子線治療 [3]、陽子線治療、BNCT(Boron Neutron Capture Therapy、中性子捕捉療法)[4]などで利用されている。これらは外科手術を必要としない非侵襲的な治療法であるため、患者の負担を減らし、通院しながら検査や治療でき、生活の質を維持できる点大きい。

産業分野では、例えば、非破壊検査 [5] [6]やレベル計 [7]に利用されている。非破壊検査装置を用いることで対象物を破壊せずに内部の状態を検査できる。破壊的な検査を実施できない社会インフラやプラントの保守点検で、非破壊検査は重要な役割を果たす。レベル計では、高温、高圧など測定困難な環境下でもタンク内に充填した液体や粉体、高粘度内容物のレベルを測定できる。

このように放射線利用が拡大するに連れて、事業所に勤務する作業員や周辺住民が被ばくする機会が増加する。放射線施設の管理者は、作業員や近隣住民への放射線被ばくを可能な限り小さくするために、放射線利用施設からの漏えい放射線や従業員の個人被ばく線量を監視しなければならない。放射線作業従事者の個人被ばく線量の一例として、令和 2 年 4 月 1 日から令和 3 年 3 月 31 日までの職業別平均年実効線量の調査報告(株式会社千代田テクノ個人被ばく線量計を利用した 306,111 名統計)によると、医療分野で 0.23mSv、工業分野で 0.07mSv、研究分野で 0.03mSv、獣医療分野で 0.02mSv となっている [8]。放射線作業従事者の被ばく限度は年間 50mSv、5 年間で 100mSv と法令で定められているが、昨年度、医療分野の 1 名が法令限度(年間 50mSv)を超えた。今後このようなことがないように適切な放射線管理が必要である。

近年では、医療分野における BNCT 治療や、産業分野における非破壊検査、原子力発電所の再稼働や六ヶ所再処理工場の稼働などによる中性子利用や中性子発生を伴う放射線利用の機会が増加している。中性子発生源には原子炉や粒子線加速器がある。原子炉ではウラン核分裂により中性子が発生する。原子炉や再処理施設では使用済み核燃料からも中性子が発生する。粒子線加速器では加速された高エネルギー粒子線がターゲットと原子核反応することで中性子が発生する。原子炉や加速器を適切に制御しなければ臨界事故や漏洩事故により大量の中性子が発生し、被ばくする恐れがある。中性子はガンマ線よりも物質透過能力が高いため、作業員はガンマ線以上に被ばくする恐れがある。また、中性子はガンマ線よりも幅広いエネルギーをもつ。原子炉のウラン核分裂では 2MeV 程度、粒子線加速器では 10MeV

以上のエネルギーの中性子が発生する。発生した中性子は施設内で散乱などにより減速するため、作業者は 0.01eV 以上の幅広いエネルギー分布をもつ中性子に被ばくする恐れがある。中性子はエネルギーによって人体への影響が異なる。また、ガンマ線よりも人体への影響が大きいため、中性子に対する被ばく線量測定は重要である。放射線被ばくは、防護量と実用量で評価、計測される。次章で両被ばく線量評価について述べる。

1.2. 被ばく線量評価

1.2.1. 防護量(実効線量)

国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiation Protection、ICRP)は放射線防護のために等価線量や実効線量である防護量を定義した [9]。これらの線量は放射線被ばくによる人体への影響を定量的に評価するものである。この放射線による人体への影響は発がんリスクであり、晩発影響の度合いを表す。法令で定める被ばく限度は、防護量に基づいて決められている。等価線量と実効線量の単位は Sv(シーベルト)である。

等価線量 H_T は、放射線による人体の組織や器官への影響を表し、式 1-1 で定義されている。

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (\text{式 1-1})$$

w_R は放射線 R に対する放射線加重係数(表 1-1 参照)、 $D_{T,R}$ は放射線 R による臓器 T の吸収線量(Gy)である。放射線加重係数は放射線の LET(Linear Energy Transfer、線エネルギー付与)の違いを人体への影響に反映させた無次元の係数であり、放射線加重係数が大きいほど人体に与える影響が大きい。LET は電離性放射線が物質中を通過する際、飛跡の単位長さ当りに損失する平均エネルギーであり、単位は J/m である。各種放射線の内、LET が小さい X 線、ガンマ線を低 LET 放射線、LET が大きいアルファ線、中性子線、その他重荷電粒子、核分裂破片を高 LET 放射線に分類する。中性子以外の放射線加重係数はエネルギーに依存しない定数が与えられている。中性子は電荷が無いので LET の概念がなじまないが、中性子により生成された 2 次荷電粒子が LET を有しており、この LET が中性子の放射線加重係数に反映され、式 1-2 で表したエネルギーに応じた関数が与えられている。

表 1-1 放射線加重係数 [9]

放射線の種類	放射線加重係数, w_R
光子	1
電子、ミュー粒子	1
陽子、荷電パイ中間子	2
アルファ粒子、核分裂片、重イオン	20
中性子	式 1-2 による

$$\begin{aligned}
 w_R &= 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6} & E_n < 1\text{MeV} \\
 w_R &= 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6} & 1\text{MeV} \leq E_n \leq 50\text{MeV} \\
 w_R &= 2.5 + 3.5e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6} & E_n > 50\text{MeV}
 \end{aligned}
 \quad (\text{式 1-2})$$

実効線量 E は、人体のすべての臓器における等価線量を組織ごとに重みを付けて合計したものであり、式 1-3 で定義される。

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (\text{式 1-3})$$

組織加重係数 w_T は、表 1-2 に示すように臓器の放射線に対する感受性の違いを表す無次元の係数である。表中の一番右列の Σw_T は同じ組織加重係数を有する臓器分を足し合わせた値であり、全臓器の合計は 1.00 となる。

表 1-2 組織加重係数 [9]

組織	組織加重係数, w_T	Σw_T
赤色骨髄、結腸、肺、胃、乳房、残りの組織*	0.12	0.72
生殖腺	0.08	0.08
膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04	0.16
骨内膜(骨表面)、脳、唾液腺、皮膚	0.01	0.04

*残りの組織：副腎、胸郭外領域、胆嚢、心臓、腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、膵臓、前立腺(男性)、小腸、脾臓、胸腺、および子宮/子宮頸部(女性)。

1.2.2. 実用量(線量当量)

線量を管理するための防護量である実効線量は、人体の各臓器における吸収線量を測定評価しなければならず直接測定できない量である。この不都合を解消するために防護量の代わりに物理学的に測定可能な実用量(線量当量)が、国際放射線単位測定委員会(International Commission on Radiation Units and Measurements、ICRU)により定義された [10]。線量当量 H は、組織内のある点における吸収線量 D とその点における線質係数 Q から式 1-4 で定義され、単位は実効線量と同じく Sv である。線質係数は、式 1-5 及び式 1-6 で定義される。

$$H = DQ \quad (\text{式 1-4})$$

$$Q = \frac{1}{D} \int_{L=0}^{\infty} Q(L) D_L dL \quad (\text{式 1-5})$$

$$\begin{aligned} Q(L) &= 1 & L < 10 \text{keV}/\mu\text{m} \\ Q(L) &= 0.32L - 2.2 & 10 \leq L \leq 100 \text{keV}/\mu\text{m} \\ Q(L) &= 300/\sqrt{L} & L > 100 \text{keV}/\mu\text{m} \end{aligned} \quad (\text{式 1-6})$$

D_L は着目する点における制限のない線エネルギー付与 L における吸収線量 D の分布である。 $Q(L)$ は L の関数として表される線質係数である。積分は全ての荷電粒子について、それらの二次電子を除いた L にわたって行う。

線量当量には、周辺線量当量 $H^*(d)$ 、方向性線量当量 $H'(d,\alpha)$ 、個人線量当量 $H_p(d)$ がある。これらの実用量は防護量を常に過大評価するように定められているため、実用量を用いることで法令の被ばく限度を超えないように作業員の放射線被ばくを管理できる。

周辺線量当量 $H^*(d)$ は、場の線量を測定するためにガンマ線や中性子などの強透過性の放射線に対して定義される。どの点においても等しい線量で、すべての放射線を一方向に揃えた放射線場(拡張整列場)を仮定しICRU球を置いたときに、放射線入射方向に対して球表面から深さ d における線量当量である(図1-1左を参照)。ICRU球は比重1の組織等価物質(質量組成比が酸素76.2%、炭素11.1%、水素10.1%、窒素2.6%)で構成された直径30cmの球と定められている。

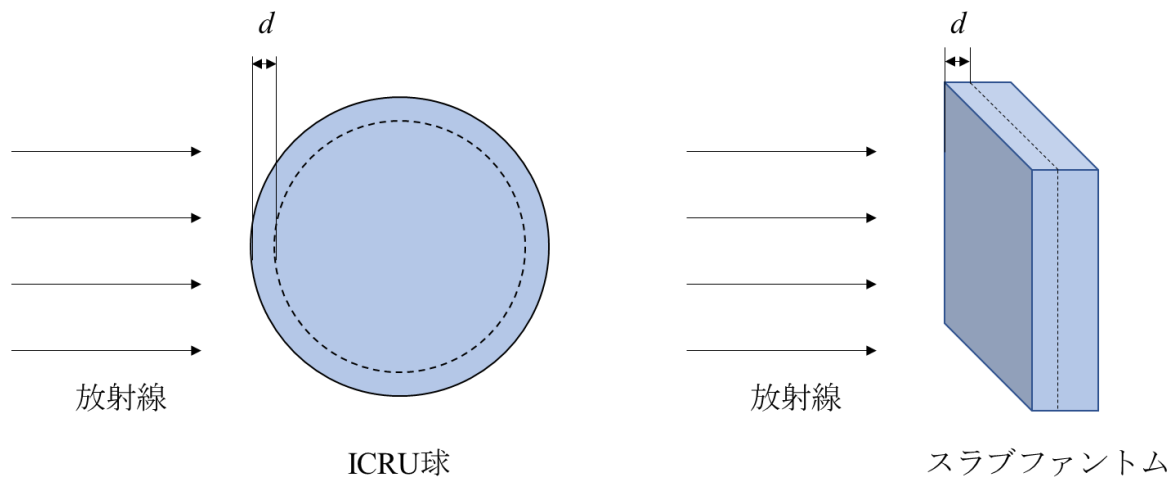


図1-1 周辺線量当量 $H^*(d)$ と個人被ばく線量当量 $H_p(d)$ の概略図。
点線で示す深さ d での線量当量を計測する。

方向性線量当量 $H'(d,\alpha)$ は、拡張整列場でICRU球にアルファ線やベータ線などの弱透過性放射線が角度 α で入射したときの線量当量である。

個人線量当量 $H_p(d)$ は個人の被ばく線量評価に用いられ、図1-1右に示すように人体を模擬したスラブファントムに放射線が入射したときに平板表面から深さ d における線量当量と定義される。強透過性放射線に対する平板からの深さ d は10mm、弱透過性放射線に対して深さ d は0.07mmと3mmである。 $H_p(0.07)$ 、 $H_p(3)$ は、それぞれ皮膚、眼の線量当量として用いられる。

中性子フルエンスを個人線量当量に換算するための1cm線量当量換算係数[11]を図1-2中の実線で示す。点線は国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission, IEC)によって定められた国際規格IEC61526[12]で規定された1cm線量当量換算係数に対する線量計のエネルギー応答特性の許容範囲を示す。IEC61526は1cm線量当量換算係数に対する線量計応答特性の許容範囲を表1-3のように規定している。図1-2より1cm線量当量換算係数は中性子エネルギーにより大きく変化することがわかる。正しい被ばく線量を評価するために中性子個人被ばく線量計は、中性子エネルギーを測定し各エネルギーの計測結果に1cm線量当量換算係数を乗じるか、1cm線量当量換算係数と同じ中性子エネルギー応答特性を持つ必要がある。

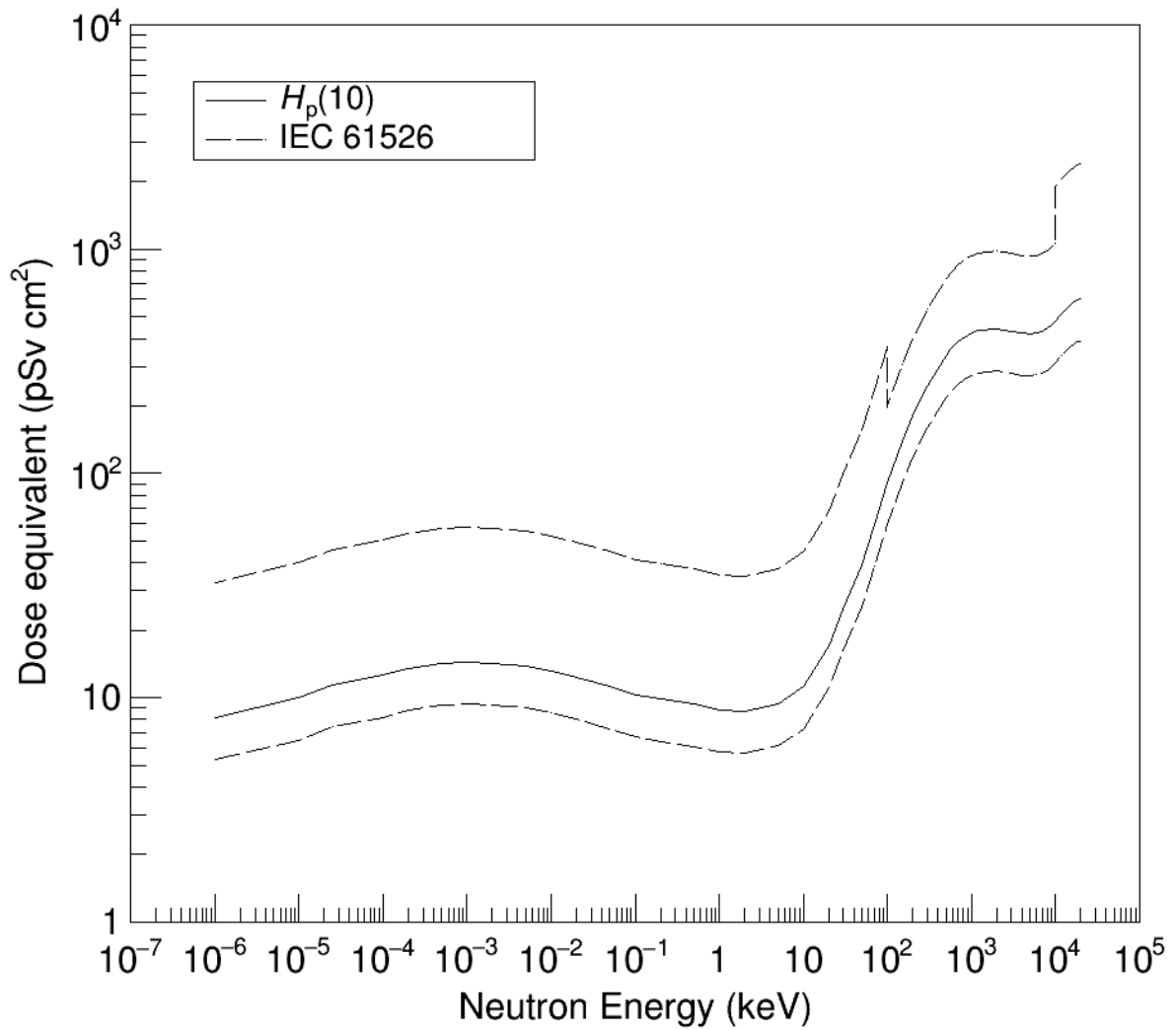


図 1-2 中性子に対する 1cm 線量当量換算係数 [11]

表 1-3 国際電気標準会議により IEC61526 [12]で規定された 1cm 線量当量換算係数に対する線量計の中性子エネルギー応答特性の許容範囲

中性子エネルギー E_n	1cm線量当量換算係数に対する許容範囲
0.025eV~100keV	-35%~+300%
100keV~5MeV	-35%~+122%
5MeV~10MeV	-35%~+122%
10MeV~	-35%~+300%

1.3. 中性子の分類

中性子はエネルギーによって物質との相互作用に特徴があり、熱中性子、低速中性子、中速中性子、高速中性子に分類される [13]。エネルギーによる中性子の分類を表 1 - 4 に示す。

表 1 - 4 エネルギーによる中性子の分類

中性子分類	中性子エネルギー E_n	主な核反応
熱中性子	0.01eV~0.1eV	弾性散乱(n,n)
低速中性子	0.1eV~1keV	捕獲(n, γ) 核変換(n,p), (n, α) 核分裂(n,f)
中速中性子	1keV~500keV	弾性散乱(n,n) 核変換(n,p), (n, α)
高速中性子	500keV~20MeV	弾性散乱(n,n) 非弾性散乱(n,n') 核変換(n,p),(n, α)

弾性散乱(n,n)は、中性子が原子核と衝突し散乱される反応である。散乱前後で中性子と原子核の運動エネルギーの総和は保存される。捕獲反応(n, γ)は、原子核が中性子を捕獲し、励起状態となり、定常状態に戻る際にガンマ線を放出する反応である。核変換(n,p)、(n, α)は、原子核が中性子を吸収し陽子やアルファ線を放出する反応である。反応エネルギー(Q 値という)が、正の場合を発熱反応、負の場合を吸熱反応という。核分裂反応は、原子力発電に利用されており、ウランやトリウムなど重い原子核に中性子が衝突すると起こる反応である。非弾性散乱は、中性子が原子核と衝突し、衝突後の原子核が励起状態となる反応である。衝突後の原子核が励起状態であるため、衝突前後で運動エネルギーが保存されない。非弾性散乱は原子核の励起エネルギーよりも大きいエネルギーを持つ中性子でしか起こらない。

中性子個人被ばく測定では、中性子エネルギー0.01eV~15MeV の中性子の測定が求められる。中性子はエネルギーごとに物質との相互作用に特徴を持つため、検出器は中性子エネルギーに応じて適切な検出方法を選択する必要がある。

1.4. 個人被ばく線量計

1.4.1. 受動型個人被ばく線量計

受動型個人被ばく線量計は電源を必要としないため常時利用できるが、被ばく線量をリアルタイムに計測できない。受動型中性子個人被ばく線量計として、フィルムバッジや熱蛍光線量計(TLD、Thermo Luminescent Dosimeter)、固体飛跡検出器が利用されている [13]。

フィルムバッジは、カドミウムとスズのフィルタを用いて放射線により生じたフィルム黒化度の差を利用して熱中性子を測定し、厚くしたフィルムの乳剤(AgBr)中で弾性散乱された反跳陽子が生成する飛跡の個数を計数することで速中性子を測定する。中性子とガンマ線により生じた黒化度の区別が難しく、時間経過により放射線によって形成された潜像が退行する現象(フェーディング現象)が起こりやすい。これらは使用上問題となる。熱蛍光線量計はリチウム-6 とリチウム-7 の含有率が異なることを利用して、両者の差から熱中性子とガンマ線を識別して計測している。しかし熱蛍光線量計単体は数 10keV 以上の中性子に対して感度が無い。この数 10keV 以上の中性子も計測できるようにしたのが TLD アルベド型線量計である。TLD アルベド型線量計は、人体で散乱した中性子を熱ルミネセンス線量計で検出する。熱中性子から速中性子まで広いエネルギー範囲を計測できる。固体飛跡検出器は、ガラスやプラスチックなどの絶縁性固体を用いた検出器である。中性子により生成された重荷電粒子が絶縁性固体に損傷を与え、エッチング処理により拡大された損傷を計数して中性子数を計測できる。ガンマ線に対して不感である利点を活かし、放射線作業従事者用の受動型個人被ばく線量計として利用されている。

1.4.2. 能動型個人被ばく線量計

能動型個人被ばく線量計はリアルタイムに被ばく線量を計測できる。作業者の被ばく線量をリアルタイムに測定できるため、被ばくの恐れがある放射線従事者が被ばく限度を超えないように管理できる。中性子測定用の能動型個人被ばく線量計には、バブル線量計 [14]やシリコン半導体式線量計 [15]がある。シリコン半導体式線量計を利用すれば、被ばく管理システムと連携でき、個人の積算線量や作業ごとの積算線量を日々管理できる [16]。これは能動型個人被ばく線量計の高い利用価値である。

バブル線量計の写真を図 1-3 に示す。この線量計が中性子を検出できる原理は、線量計内部が過熱状態にある液体で満たされており、中性子との核反応により発生した熱で液体が沸騰し、その気泡の個数を数えるものである。ガンマ線に対して不感であるが、温度による感度変化が大きい。シリコン半導体技術が進歩した 1980 年ごろからシリコン半導体を用いた能動型個人被ばく線量計が利用されている。逆バイアス印加で拡げられた空乏層で放射線により電離した電子正孔対を電気信号として検出する。富士電機(株)が世界で初めてシリコン半導体を用いた中性子個人被ばく線量計を製品化した。シリコン半導体を用いた能動型個人被ばく線量計が、全国の原子力発電所や核燃料再処理施設、中性子線源を用いた非破壊検査試験所、病院、研究所などで使用されている。現在、富士電機(株)製の NRG11(図 1-4)や、Mirion Technologies 社製の DMC3000 [17]などが利用されている。



図 1 - 3 バブル線量計(BTI 社製) [14]



図 1 - 4 富士電機(株)製 ガンマ・中性子測定用個人被ばく線量計(NRG11)

販売されている能動型個人被ばく線量計は、海外販売では IEC 規格、国内販売では JIS 規格(Japanese Industrial Standards、日本産業規格)への準拠を求められることが多い。IEC は電気製品の規格や測定方法を定める国際的な標準化団体であり、各国間においてその規格に適合した製品の品質と安全性を保障する適合性評価制度を提供している。日本の国家規格である JIS 規格は、国際的な貿易を円滑に進めるために IEC 国際規格との整合がとられている。

1.4.3. シリコン半導体の放射線検出原理

シリコン半導体は、図 1-5 に示すような価電子帯、伝導帯、禁制帯のエネルギーバンド構造を持つ。価電子帯は電子で満たされており、電子が自由に動けない領域である。伝導帯は電子が自由に動ける領域であり、半導体や絶縁体の場合、電子が存在しない。禁制帯は電子が存在できない領域である。半導体や絶縁体は、外部からのエネルギーによって価電子帯の電子が禁制帯のエネルギーギャップを超え、伝導帯に励起された電子により電気伝導性を示す。シリコン半導体のエネルギーギャップは約 1.1eV である [18]。

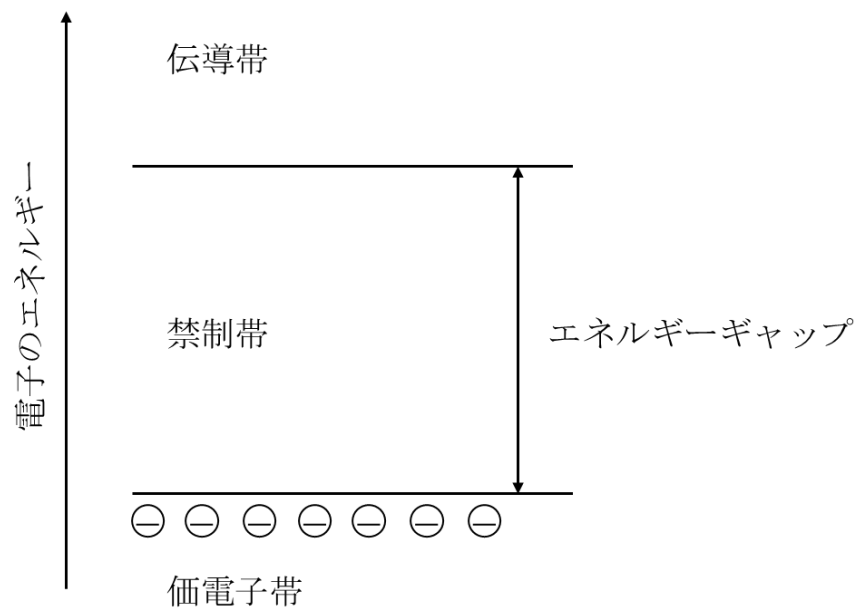


図 1-5 エネルギーバンド構造

半導体は真性半導体、 p 型半導体、 n 型半導体に分類できる。真性半導体は不純物を添加していない半導体である。 p 型シリコン半導体は不純物として 3 価の物質を添加した半導体である。4 価のシリコンが 3 価の不純物と共有結合したとき、共有結合が 1 つだけ不完全な状態となる。この状態から電子を得て負イオンとなる不純物原子をアクセプタという。もともと電子があったところには電子の抜け穴として正孔ができるため、 p 型半導体はキャリアとして多数の正孔を持つ。一方、 n 型シリコン半導体は、不純物として 5 価の物質を添加した半導体であり、共有結合によって電子が 1 つ余る。この電子は不純物原子から離れて伝導電子となり、不純物原子は正イオンとなる。このように電子を放出して正イオンとなる不純物をドナーという。 n 型半導体はキャリアとして多数の電子をもつ。

p 型半導体と n 型半導体を接合(pn 接合)すると、 p 型半導体領域にあった過剰な正孔は n 型半導体領域へ、 n 型半導体領域にあった過剰な電子は p 型半導体領域へ拡散し、正孔や電子といった電気伝導に寄与するキャリアが少ない領域ができる。この電子と正孔が不足している領域を空乏層という。空乏層では、 p 型と n 型領域でそれぞれ負と正にイオン化したアクセプタとドナーが残り、これによって電界が形成される。この電界は、正孔の n 型領域への移動と電子の p 型領域への移動を妨げるため、 pn 接合により正孔と電子の移動はあるところで停止する。

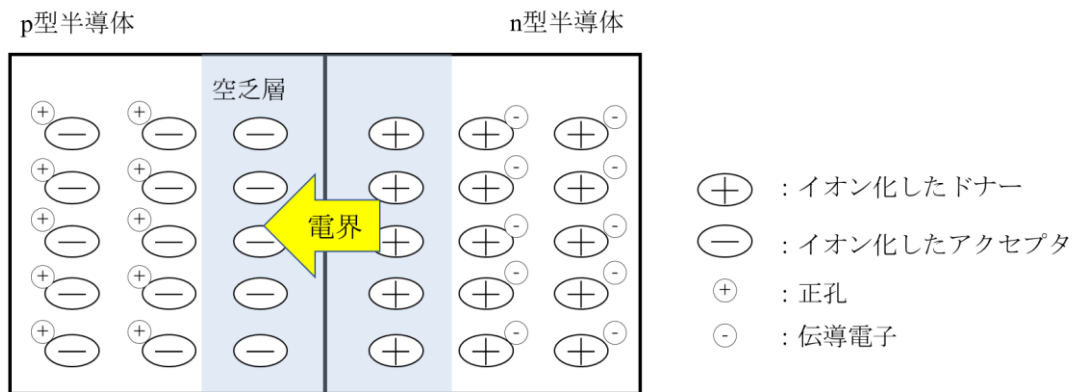


図 1-6 p 型半導体と n 型半導体を接合した状態。自己電荷により電界が生じ空乏層が形成される。

この空乏層内を荷電粒子が通過すると、電離作用により空乏層内で電子正孔対が生成される。この電子正孔対生成に要する平均エネルギー ϵ は約 3.6eV である [19]。この生成された電子正孔対は空乏層内の電位差により電極に収集され、電気信号として直接取り出される。pn 接合により生じた電位差は小さいため、生成された電子正孔対は電極に収集される前に再結合され、完全に収集できない。pn 接合に逆バイアス(p 型半導体側に負電極、n 型半導体側に正電極)を印加し電位差を大きくすることで、電子と正孔が再結合をする前に電子及び正孔を収集する。逆バイアス印加により空乏層領域が広がり、ガンマ線や中性子により生成された 2 次荷電粒子が通過する領域も拡大する。このようにして、シリコン半導体は荷電粒子を検出できる。

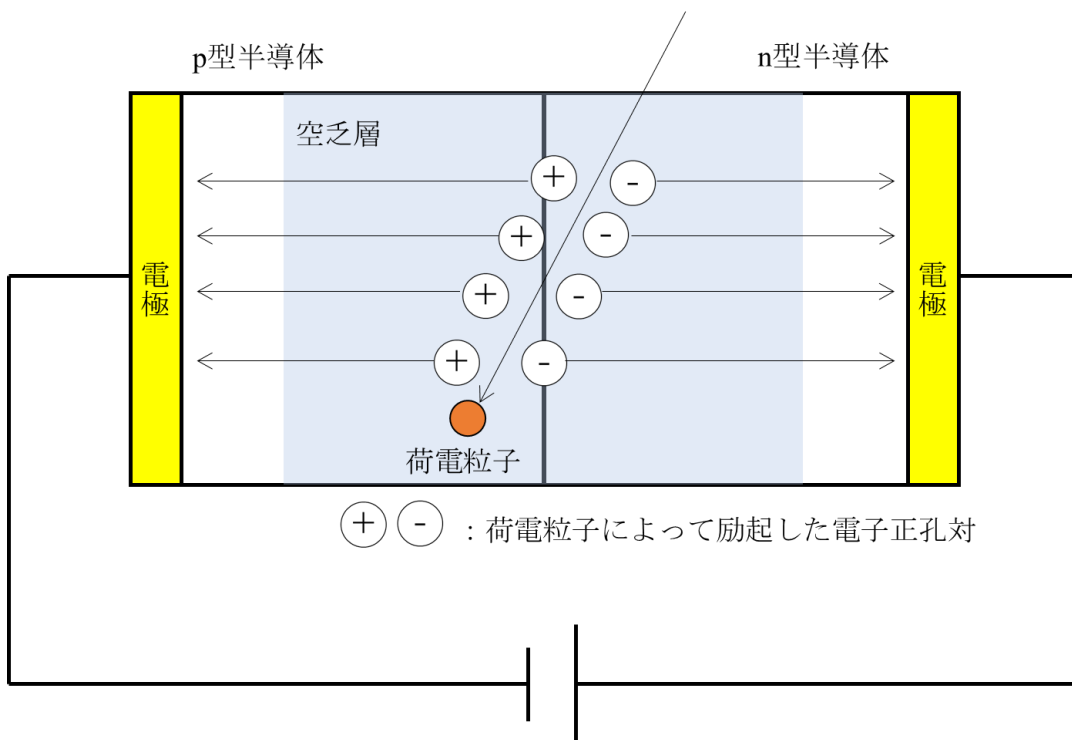
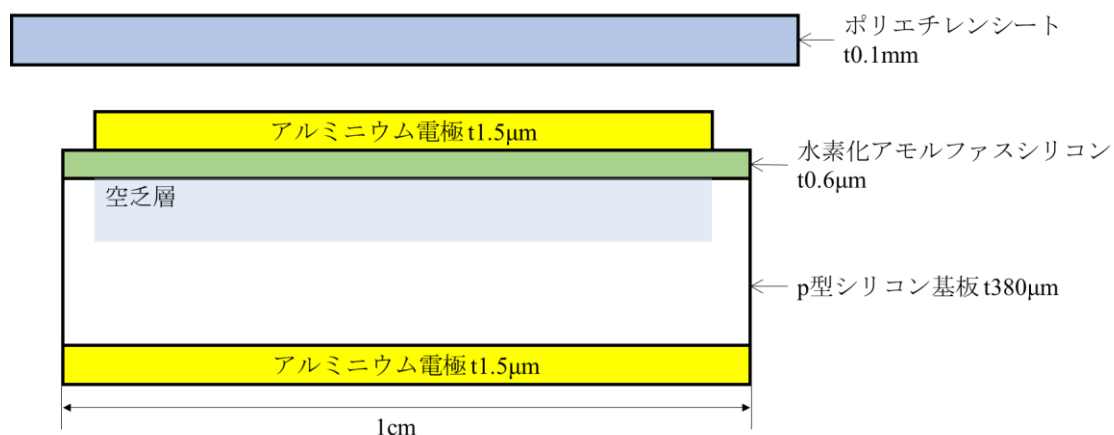


図 1-7 pn 接合に逆バイアスを印加して生成された空乏層に 2 次荷電粒子が通過している概略図。生成された電子正孔対を収集。

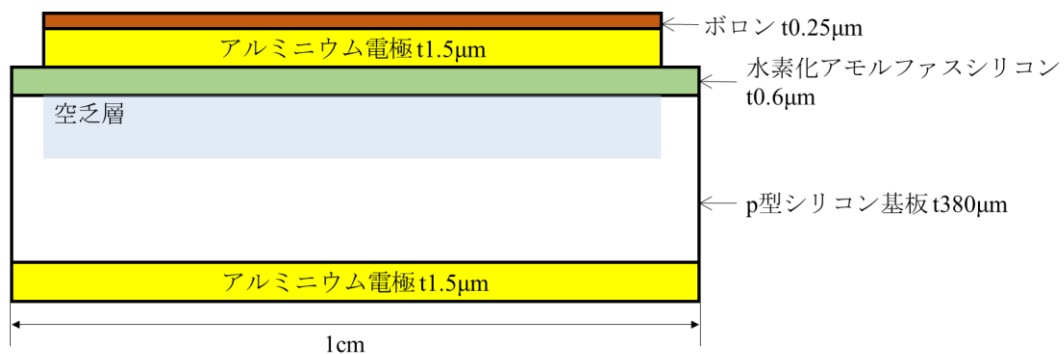
荷電粒子であるアルファ線やベータ線は、直接空乏層内で電離作用を引き起こし、電子正孔対を生成する。一方、電磁波であるガンマ線は電荷がないため、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の相互作用で電子を生成し、この電子が空乏層内で電離作用を引き起こし、電子正孔対を生成する。中性子も電荷が無いため直接電離を引き起こすことができない。中性子と物質構成原子核との核反応により発生した2次荷電粒子が、空乏層内で電離作用を引き起こし、電子正孔対を生成する。このようにして、アルファ線やベータ線などの直接電離放射線とガンマ線や中性子の間接電離放射線を検出できる。これらの測定原理とシリコン pn 接合ダイオードを組合せた中性子検出器が利用されている。

1.4.4. 富士電機(株)製リアルタイム中性子個人被ばく線量計

中性子個人被ばく線量計は $0.025\text{eV} \sim 15\text{MeV}$ に及ぶ幅広いエネルギー範囲を有する中性子を測定しなければならない。富士電機(株)製の中性子個人被ばく線量計は、速中性子用と熱中性子用に2つのセンサーを使用し、この幅広いエネルギー範囲を有する中性子を検出している。速中性子センサーは中速中性子や高速中性子など中性子エネルギー数 100keV 以上の中性子を、熱中性子センサーは熱中性子や低速中性子、中速中性子など数 100keV 以下の中性子を測定対象としている。中性子個人被ばく線量計に使用されている速中性子センサーと熱中性子センサーの概略図を図1-8に示す [20] [21] [22]。



(a) 速中性子センサー



(b) 熱中性子センサー

図1-8 富士電機(株)製中性子個人被ばく線量計に使用されているセンサーの概略図

使用されているシリコン半導体の表面が $1 \times 1 \text{cm}$ 、厚さ $380 \mu\text{m}$ の p 型シリコン基板上にプラズマ CVD 方式 [23] で厚さ $0.6 \mu\text{m}$ の水素化アモルファスシリコンを成膜したものである。

速中性子センサーの構造を図 1-8(a) に示す。水素化アモルファスシリコン上面と反対面に厚さ $1.5 \mu\text{m}$ のアルミニウム電極を蒸着し、 0.1mm のポリエチレンシートを最上部に配置している。中性子とポリエチレンシート中の水素との原子核反応 ${}^1\text{H}(\text{n}, \text{p})$ により反跳された陽子をシリコン半導体で検出する。逆バイアス $+3 \text{V}$ を印加し、深さ $30 \mu\text{m}$ の空乏層を形成している。

熱中性子センサーの構造を図 1-8(b) に示す。水素化アモルファスシリコン上面と反対面に厚さ $1.5 \mu\text{m}$ のアルミニウム電極を蒸着し、上面のアルミニウム電極に天然ボロンを厚さ $0.25 \mu\text{m}$ 形成する。中性子とボロン-10 との原子核反応 ${}^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha){}^7\text{Li}$ により放出されたアルファ線をシリコン半導体で検出する。逆バイアス $+3 \text{V}$ を印加し、深さ $30 \mu\text{m}$ の空乏層を形成している。

1.5. 中性子個人被ばく線量計の問題点

1.5.1. 全体概要

富士電機(株)製の中性子個人被ばく線量計の中性子エネルギー応答特性を図 1-9 に示す。縦軸は中性子フルエンス当たりの 1cm 線量当量、横軸は中性子エネルギーを示す。黒丸付赤線は速中性子センサー (fast neutron sensor)、黒四角付青線は熱中性子センサー (thermal neutron sensor) のエネルギー応答特性を表す。このエネルギー応答特性は単位照射中性子フルエンス当たりの中性子検出数である。黒実線は国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiation Protection、ICRP) が提唱した 1cm 線量当量換算係数 ($H_p(10)$) である [11]。速中性子センサーと熱中性子センサーのエネルギー応答特性を 1cm 線量当量換算係数に規格化している。

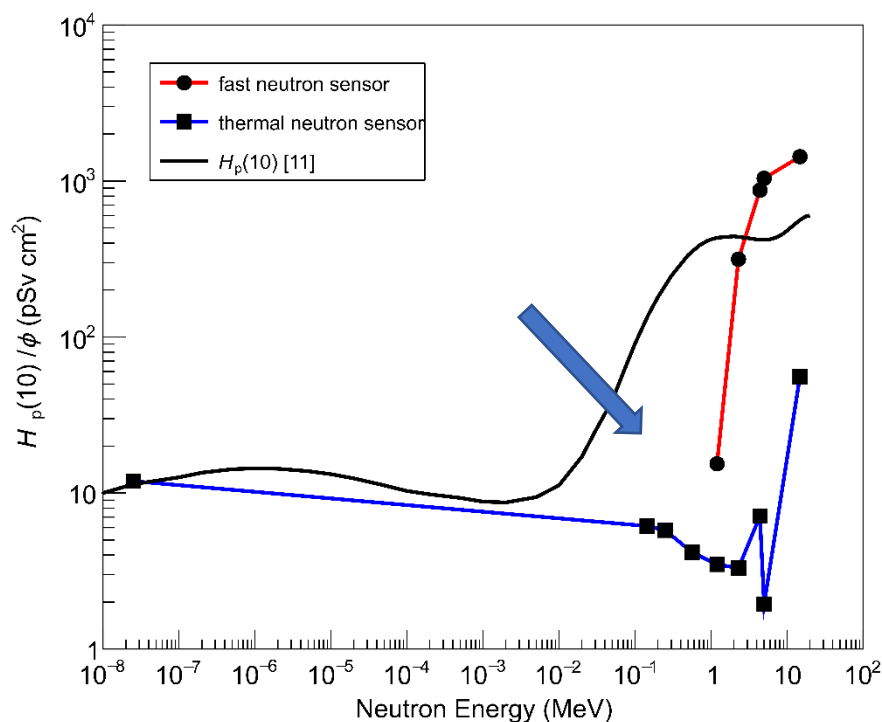


図 1-9 富士電機(株)製中性子個人被ばく線量計に利用されている速中性子センサー (fast neutron sensor) と熱中性子センサー (thermal neutron sensor) の中性子エネルギー応答特性と国際放射線防護委員会が提唱した 1cm 線量当量換算係数、 $H_p(10)$ [11]

速中性子センサーと熱中性子センサーを使うことで中性子エネルギー 0.025eV~15MeV の幅広い領域を測定できている。しかし、図中矢印で示した 100keV~1 MeV の中性子エネルギー範囲で、両中性子センサーのエネルギー応答特性は 1cm 線量当量換算係数に対して過小評価である。この過少なエネルギー応答特性が原因となり、利用される放射線環境 (中性子エネルギースペクトル) [24] によっては被ばく線量を正確に測定できない恐れがある [25]。そのため、放射線被ばく管理者から中性子個人被ばく線量計の改善が求められている。現在利用されている他社の能動型中性子個人被ばく線量計も同様の課題を抱えている。

1.5.2. 速中性子センサー

速中性子センサーの応答特性が中性子エネルギー1MeV 以下で低下しているのは、ガンマ線感度と反跳陽子のエネルギー損失が原因である。

中性子は常にガンマ線と混在しているため、中性子計測では必ずガンマ線を弁別する必要がある。ガンマ線が生成した2次電子は阻止能が小さいためシリコン半導体に吸収されるエネルギーも小さく、小さな電気信号が得られる。それに対して中性子により反跳された陽子は阻止能が大きいためシリコン半導体に吸収されるエネルギーが大きく、大きな電気信号が得られる。この電気信号の大きさの違いを利用して中性子による事象とガンマ線による事象を識別している。波高弁別法である。ところが、従来の個人被ばく線量計で利用されていた速中性子センサーは空乏層以外のシリコン母体が厚いため、ガンマ線により生成された電子がファネリング現象 [26]を引き起こし、想定よりも大きなエネルギー吸収により大きな電気信号を出力していた。ファネリング現象は、図1-10のように発生した電子が空乏層外のシリコン母体に作用し、見かけ上空乏層領域を広くし、より多くの電荷を収集する現象である。ファネリング現象による大きな電気信号を識別するためにディスクリレベルを高く設定しなければならず、低いエネルギーの反跳陽子の信号はディスクリレベル以下となり、検出できなくなった。この高いディスクリレベルが起因となり、速中性子センサーの検出可能な最小中性子エネルギーが高くなっている。

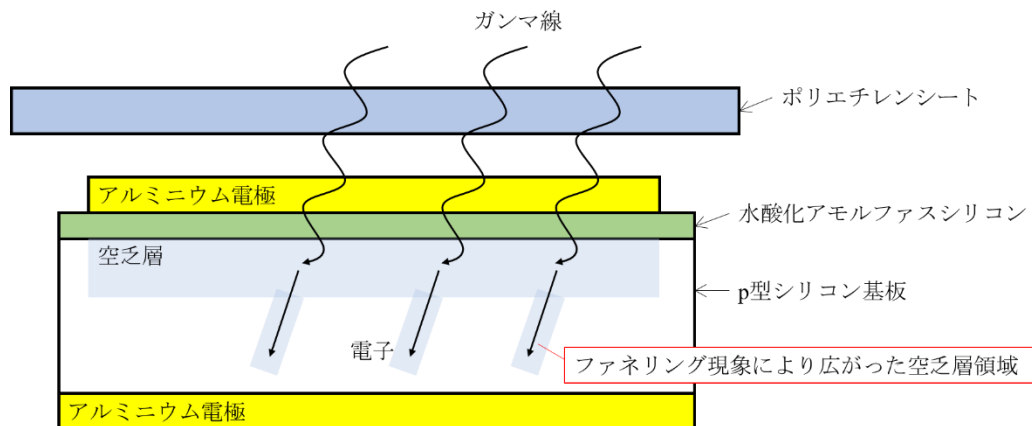


図1-10 ファネリング現象 [26]のイメージ

速中性子センサーを用いて、中性子エネルギー1MeV 以下を計測するには、1MeV 以下の反跳陽子を検出しなければならない。エネルギー1MeV の陽子の飛程はシリコン中で16 μm であり、かなり短い。この飛程が短い反跳陽子はシリコン半導体中の空乏層で検出される前に、表面電極などでエネルギーを大きく損失する。そのため検出可能な反跳陽子のエネルギーも小さくなる。

ガンマ線に対する感度と反跳陽子のエネルギー損失による問題を図1-11に示す。ガンマ線弁別と反跳陽子のエネルギー損失により、中性子検出効率として得られる応答は極めて小さくなる。これにより速中性子センサーではエネルギー1MeV 以下の中性子が検出困難になっている。

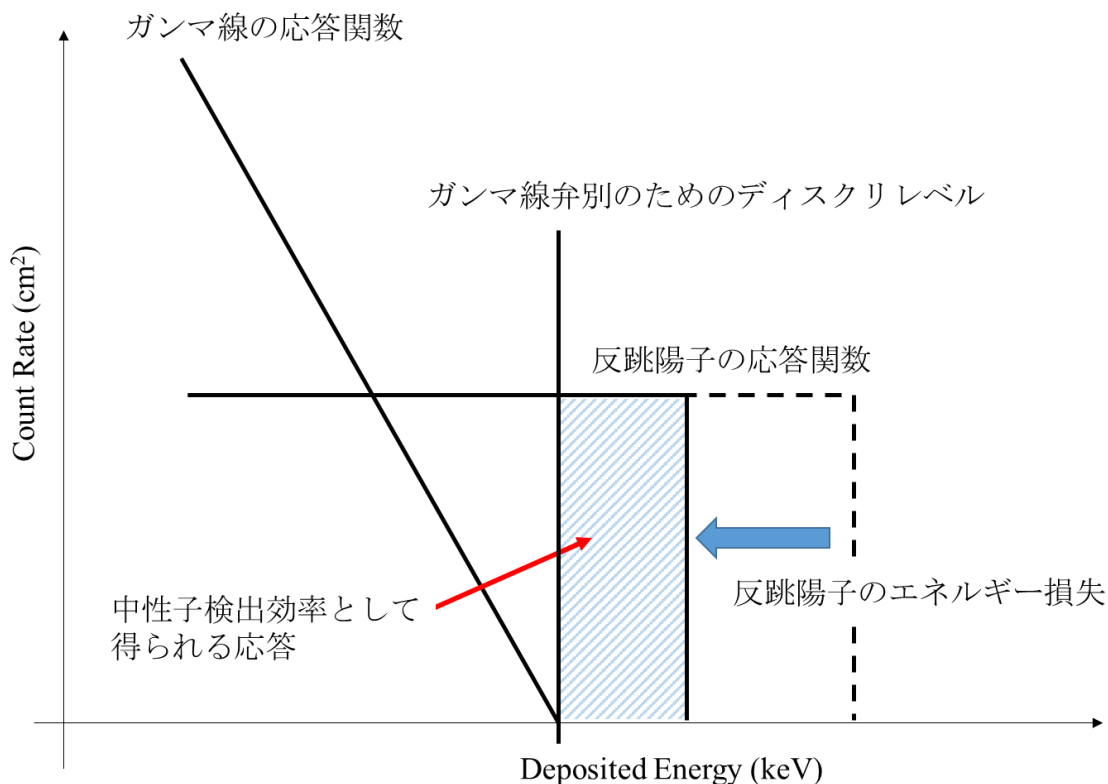


図 1 - 11 現在の速中性子センサーを用いた中性子検出波高分布図の概略。ガンマ線に対する感度と反跳陽子のエネルギー損失により検出される中性子は限定される。

1.5.3. 熱中性子センサー

熱中性子センサーのエネルギー応答特性が中性子エネルギー100keV 以上で低下しているのは、応答特性がラジエータであるボロンの核反応断面積のエネルギー特性に依存しているためである。多くの中性子と原子核との核反応断面積は中性子の速度に反比例して小さくなる。ボロン-10 原子核と中性子の核反応断面積も中性子エネルギーが大きくなるにしたがい小さくなる。この減少が原因となり、熱中性子センサーの応答特性も低下している。この応答特性低下の対策として、中性子エネルギー100keV 以上で核反応断面積の低下が少ない原子核の選択が考えられる。また、図 1 - 9 に示すように 1cm 線量当量換算係数は 10keV 以下でエネルギー依存性の小さい平坦な特性となっているため、10keV 以下の応答特性も核反応断面積のエネルギー特性に依存しない対策が必要となる。

1.6. 本研究の目的

本研究の目的は、中性子エネルギー100keV～1MeVにおいて中性子個人線量計のエネルギー応答特性の1cm線量当量換算係数に対する過小評価を改善することである。そのために新たに開発した反転薄型シリコンダイオードを速中性子センサーと熱中性子センサーに適用した。

第2章では、新たに開発した反転薄型シリコンダイオードとそれを使用した新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーについて記載する。

第3章では、反転薄型シリコンダイオードを使用した新型速中性子センサーの評価方法と結果について記載する。ガンマ線感度測定によりガンマ線弁別のためのディスクリレベルを決定し、中性子照射実験とモンテカルロシミュレーションにより中性子応答特性を評価した。

第4章では、反転薄型シリコンダイオードを使用した新型熱中性子センサーの構造設計について記載する。10keV以下の中性子エネルギー応答特性がラジエータの核反応断面積に依存しないよう、新型熱中性子センサー応答特性の中性子入射角度依存性を評価し、10keV以下の応答特性が1cm線量当量換算係数のエネルギー特性に近くなる構造を決定した。

第5章では、新型熱中性子センサーの評価方法と結果について記載する。中性子照射実験とモンテカルロシミュレーションにより中性子応答特性を評価した。

第6章では、個別に評価した新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーを組み合わせ、中性子個人被ばく線量計の中性子エネルギー応答特性を評価した。

2. 新型中性子センサー

2.1. 反転薄型シリコンダイオード

新たに開発した反転薄型シリコンダイオードを速中性子センサーと熱中性子センサーに使用した。反転薄型シリコンダイオードの製作工程を図 2 - 1 に示す。このダイオードは、アンチモンをドーピングした 9.33mm 角の n 型 CZochralski(CZ)-シリコン基板上に、エピタキシャル成長法 [27]によりノンドープのシリコン結晶を厚さ 40 μm 形成する。続いて酸化膜を熱酸化処理により成膜し、中央部をエッチングし、表出したノンドープ層に濃度 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のボロンをドーピングし、数 μm の p 型半導体を形成する。その上に厚さ 1 μm のアルミニウム電極をスパッタリングにより成膜する(図 2 - 1(a))。CZ-シリコン基板は研削して除去し、電極として 0.1 μm のチタンとアルミニウムをスパッタリングにより成膜する(図 2 - 1(b))。最後に、中性子入射面の不感層を薄い面とするために、シリコンダイオードを反転する(図 2 - 1 (c))。この状態を反転薄型シリコンダイオードと呼ぶ。2 次荷電粒子入射面の不感層厚は 0.7 μm 程度となる。この反転薄型ダイオードは pin 半導体として機能し、+3V の逆バイアスを印加するとノンドープ層に 40 μm 程度の空乏層が形成される。

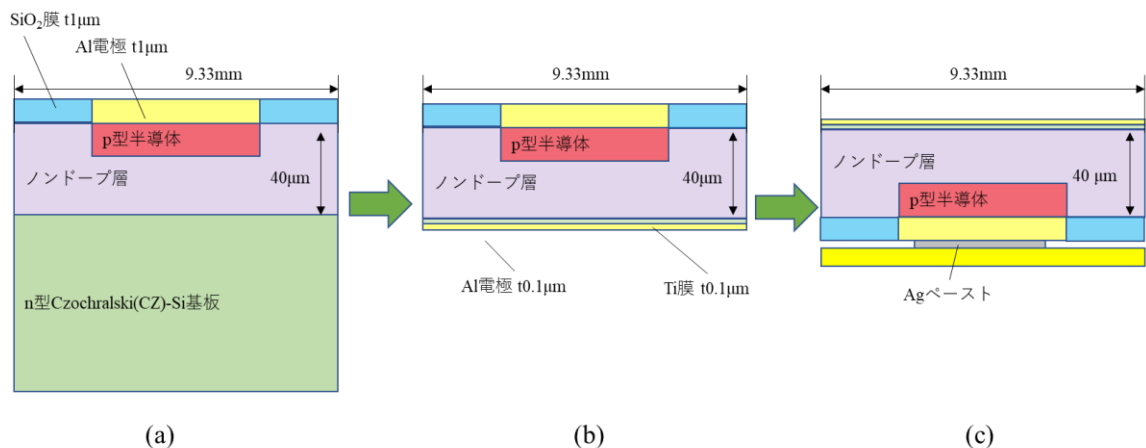


図 2 - 1 反転薄型シリコンダイオードの製作工程

反転薄型シリコンダイオードは、シリコン母体部で起こるファネリング現象 [26]を抑え、ガンマ線の感度を低下させることができる。これにより速中性子センサーにおいてガンマ線弁別のためのディスクリレベルを下げられる。また、2 次荷電粒子の入射面を薄くすることで 2 次荷電粒子の入射過程で起こるエネルギー損失を減らし、中性子検出下限エネルギーを低くし中性子感度を上げることができる。

図 2-2 は、Polyphenylenesulfide(PPS、ポリフェニレンスルファイド)パッケージに封入した反転薄型シリコンダイオードの写真である。PPS パッケージにはシリコンダイオードから電荷信号を取出す端子が付けられており、容易に電子回路に実装できるようになっている。実験では、外来電気ノイズをカットするために PPS パッケージを 6×6×3cm、厚さ 2mm のアルミニウムケースに格納し、端子からアルミニウムケースの同軸端子に信号線を接続し、この同軸端子に電子機器を接続して測定を行った(図 2-3)。

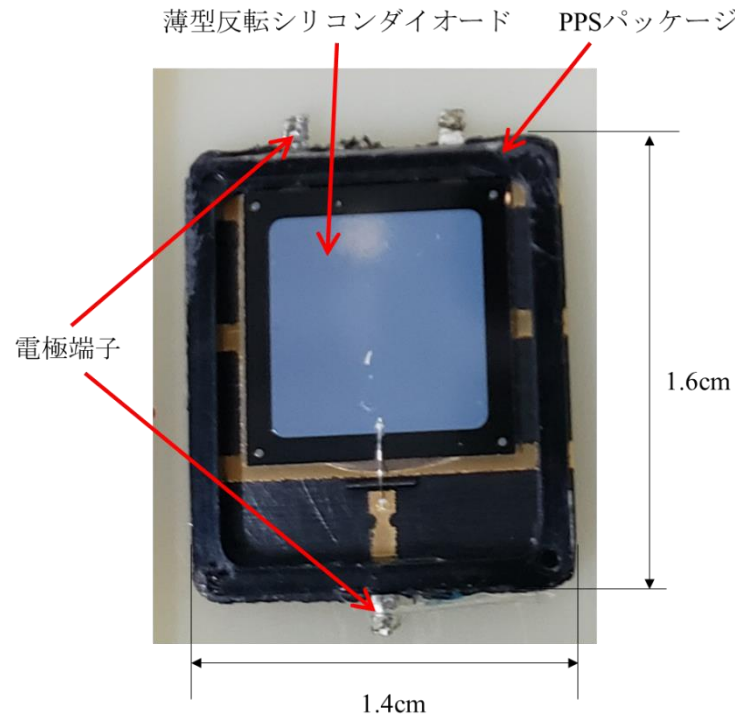


図 2-2 ポリフェニレンスルファイド(PPS)パッケージに封入した反転薄型シリコンダイオード

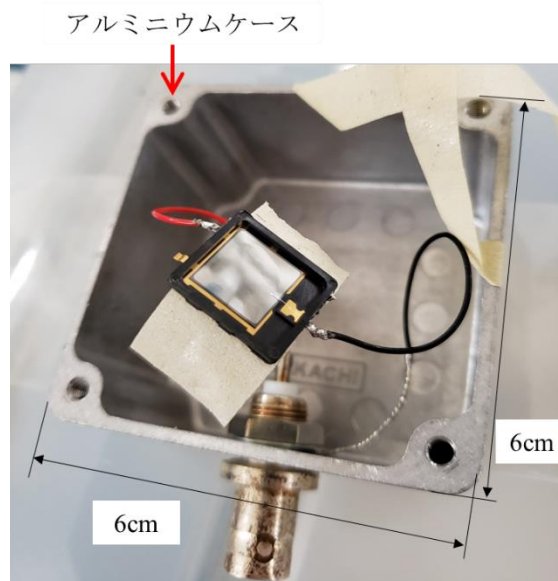


図 2-3 アルミニウムケースに格納した反転薄型シリコンダイオード

2.2. 新型速中性子センサー

2.2.1. 新型速中性子センサーの概要

反転薄型シリコンダイオードを用いた新型速中性子センサーを図 2 - 4 に示す。新型速中性子センサーでは、ポリエチレンシートをラジエータとして使用しており、 ${}^1\text{H}(n,p)$ の核反応により生じた反跳陽子を検出する。ポリエチレンシートは、大きさ $1.1 \times 1.3\text{cm}$ 、厚さ $250\mu\text{m}$ であり、大きさ $1.4 \times 1.6\text{cm}$ 、厚さ $300\mu\text{m}$ のアルミ板に張り付けた。図 2 - 4(右)に示すように、ポリエチレンシートがシリコンダイオード側に向くように PPS パッケージにかぶせた。これが反転薄型シリコンダイオードを使用した新型速中性子センサーである。

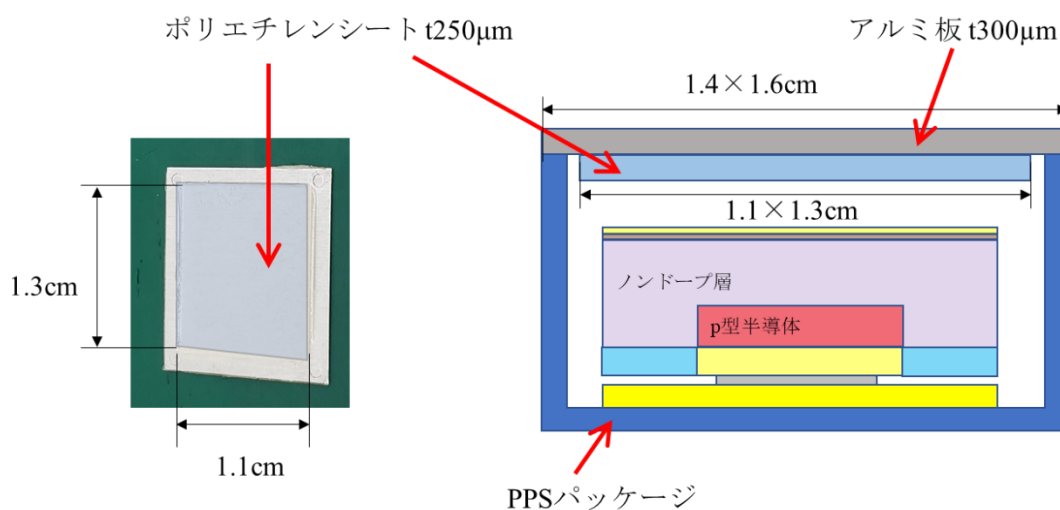


図 2 - 4 新型速中性子センサーの構造。ポリエチレンシートが反転薄型シリコンダイオード側を向くように PPS パッケージにかぶせた。

2.3. 新型熱中性子センサー

2.3.1. 新型熱中性子センサーの概要

新型熱中性子センサーは反転薄型シリコンダイオードと熱中性子ラジエータで構成される。中性子エネルギー100keV以上で応答特性の低下を防ぐために、新しいラジエータとしてリチウム-6を採用した。リチウム-6は化合物フッ化リチウムとして使用する。リチウム-6を採用した理由は、図2-5中の矢印で示すようにリチウム-6の ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 核反応断面積 [28]が、250keV付近に半値幅が約100keVのピークを持つためである。これは、共鳴ピークと呼ばれ、原子核の励起エネルギーに等しいエネルギーの中性子が入射したときに大きな核反応断面積を示す現象である [29]。このピークを活用することで、新型熱中性子センサーの応答特性は100keV以上で低下することなく、1cm線量当量換算係数に対する過小評価を避けられる。

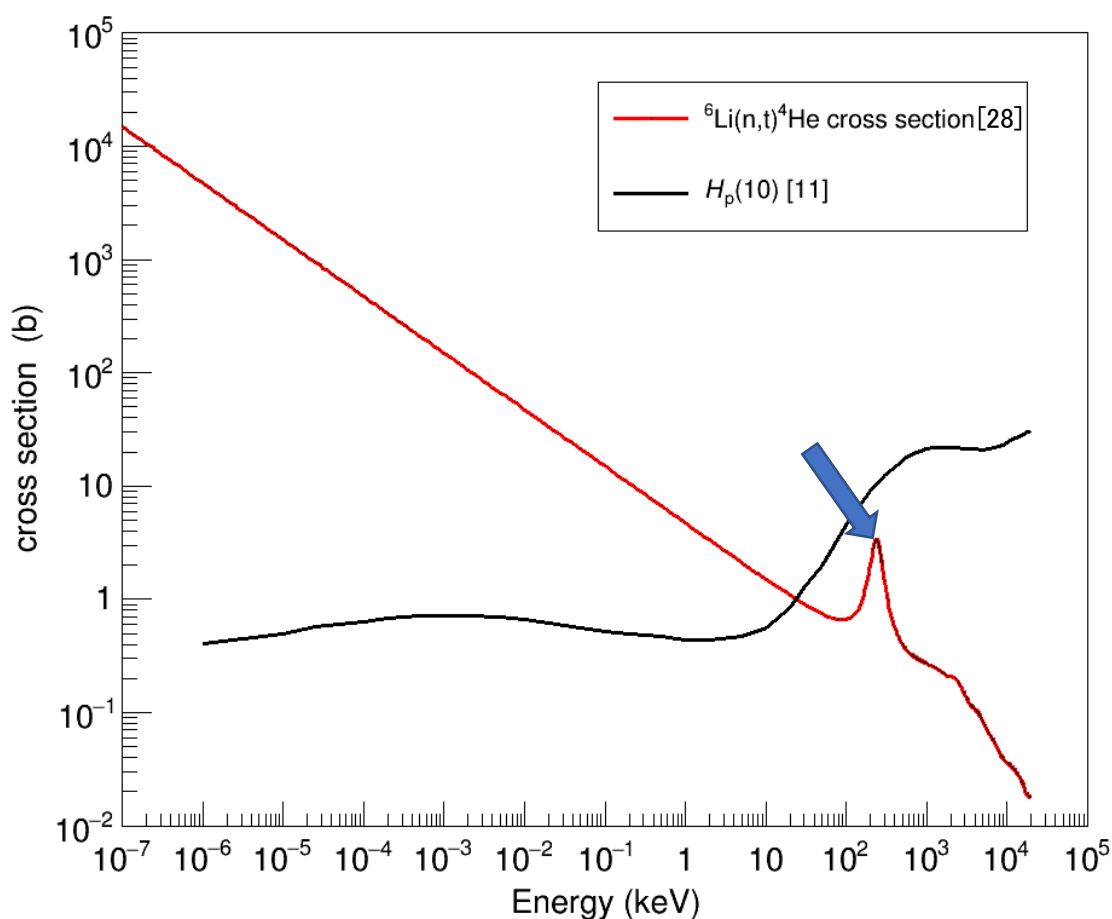


図2-5 1cm線量当量換算係数 [11]と ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 原子核反応の断面積 [28]

リチウム-6 は中性子との核反応 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ によりトリトンとアルファ線を生成する。 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応により放出するエネルギー Q 値、熱中性子における核反応断面積 σ 、生成される 2 次荷電粒子のエネルギー E' 及びシリコン半導体中の飛程 R を表 2 - 1 に示す。

表 2 - 1 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応の Q 値、熱中性子における核反応断面積 σ 及び生成される 2 次荷電粒子のエネルギー E' とシリコン半導体中の飛程 R

Q 値(MeV)	σ (b)	E' (MeV)	R (μm)
4.78	940	トリトン : 2.73 アルファ線 : 2.05	トリトン : 26.3 アルファ線 : 7.47

新型熱中性子センサーでは、トリトンのみを検出するようアルファ線の最大エネルギー 2.05MeV にディスクリレベルを設ける。放出されたアルファ線のエネルギーは低く、飛程が短いため、アルファ線がフッ化リチウムラジエータ中で停止し、シリコンダイオードに到達できないことがある。アルファ線の自己吸収である。これは中性子ラジエータの厚さに関係し、検出効率の誤差要因となりうるため、アルファ線を検出せずにトリトンのみ検出するエネルギーにディスクリレベルを設定した。

フッ化リチウムラジエータ内での最大飛程は、2.73MeV のトリトンでは 20.7 μm であるのに対して、2.05 MeV のアルファ線では 5.71 μm となる。フッ化リチウムラジエータの厚さが 5.71 μm 以上になると、より深い位置で発生したアルファ線は中性子ラジエータ中で全エネルギーを損失してシリコンダイオードに到達できず検出されない。同様に 20.7 μm 以上になると、より深い位置で発生したトリトンは中性子ラジエータ中で全エネルギーを損失してシリコンダイオードに到達できない。すなわちフッ化リチウムラジエータ中で自己吸収が起こる。熱中性子に対する検出感度を大きくなるように、これらを考慮してフッ化リチウムラジエータの厚みを決定した。

2.3.2. 熱中性子ラジエータ製作

新型熱中性子センサーのラジエータは、中性子感度を高くするためにリチウム-6 を 95%濃縮したフッ化リチウム(メーカー : ISOTEC)を使用した。フッ化リチウムは、国立研究開発法人 産業技術総合研究所(以下、産総研という)の真空蒸着装置を用いて大きさ 1.4 \times 1.6cm、厚さ 1mm のアルミニウム基板上に大きさ 1.0 \times 1.2cm 蒸着した。アルミニウム基板は、フッ化リチウム蒸着前に基板表面に付着した汚れを超音波洗浄器で除去した。真空蒸着装置内にアルミニウム基板とフッ化リチウムを 8cm 離して設置し、 5×10^{-6} Torr まで真空引きをした。フッ化リチウム 3g をるつぼに入れてセットし、温度を上げ、フッ化リチウムをアルミニウム基板に蒸着した。フッ化リチウムは 20.7 μm を上限として厚く蒸着した。フッ化リチウムを厚くするほど検出効率は増加するが、最大飛程 20.7 μm 以上ではトリトンのフッ化リチウム中での自己吸収により検出感度増加に寄与しないためである。

フッ化リチウムを蒸着したアルミニウム基板は、図 2 - 6 に示すようにフッ化リチウムを反転薄型シリコンダイオード側に向けて PPS パッケージにかぶせた。

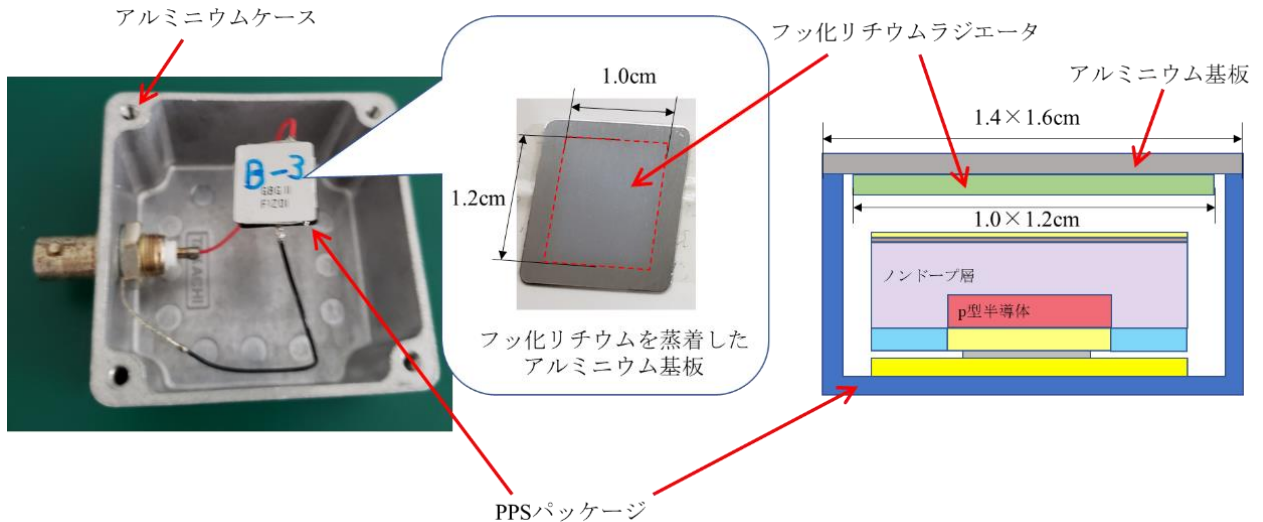


図 2 - 6 新型熱中性子センサーの構造。フッ化リチウムを反転薄型シリコンダイオード側に向けて PPS パッケージにかぶせた。

2.3.3. 熱中性子ラジエータの膜厚測定

フッ化リチウムの膜厚は富士電機(株)で FE-SEM(Field Emission- Scanning Electron Microscope、電界放出型走査電子顕微鏡) [30]と触針式粗さ計によって評価された。評価用の試料は、実際に使用する新型熱中性子センサーのラジエータと同じ条件でシリコン基板上に蒸着したものである。シリコン基板上としたのは、表面の凹凸や傷が少なく、膜厚測定に適しているためである。フッ化リチウムはシリコン基板上に蒸着後、ナイフを用いてフッ化リチウム中央部に測定用断面を作成した(図 2 - 7)。

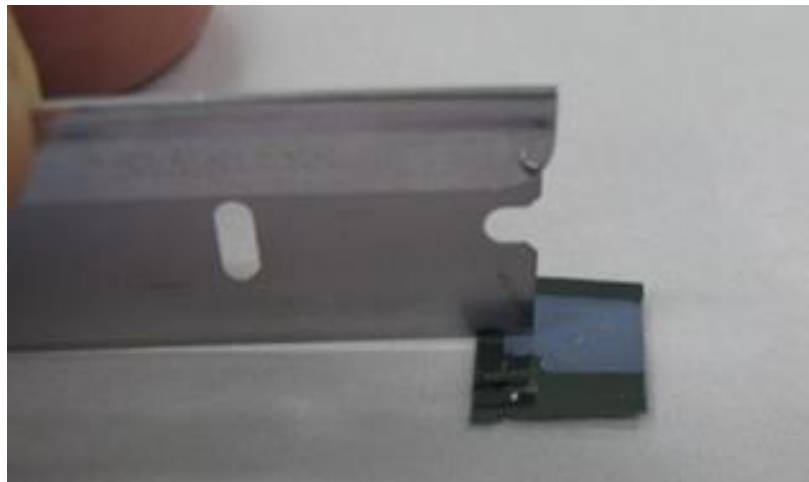


図 2 - 7 シリコン基板上に蒸着したフッ化リチウム。フッ化リチウム中央部に膜厚評価用断面を作成した。

FE-SEM は、日立製作所製の SU8230 を使用した。SEM は、物質に電子ビームを照射したときに発生する 2 次電子を利用したものである。2 次電子の発生は物質の表面の凹凸によって変わるため、測定範囲をスキャンしながら電子を照射していき、照射位置から発生した 2 次電子を検出していくことで表面状態を映し出すことができる。通常の SEM は熱エネルギーによって電子を放出するが、FE-SEM は電界

によって電子を放出するものであり、SEM よりも電子ビームを細くすることができるため、より高分解能に表面を測定することができる。測定における電子線加速電圧は 1kV である。測定は、フッ化リチウムの端面を見るためにシリコン基板を 50°傾けて電子ビームを照射した。FE-SEM により測定したフッ化リチウム端面を図 2-8 に示す。画像からフッ化リチウムの膜厚を 8.55 μm と計測できた。

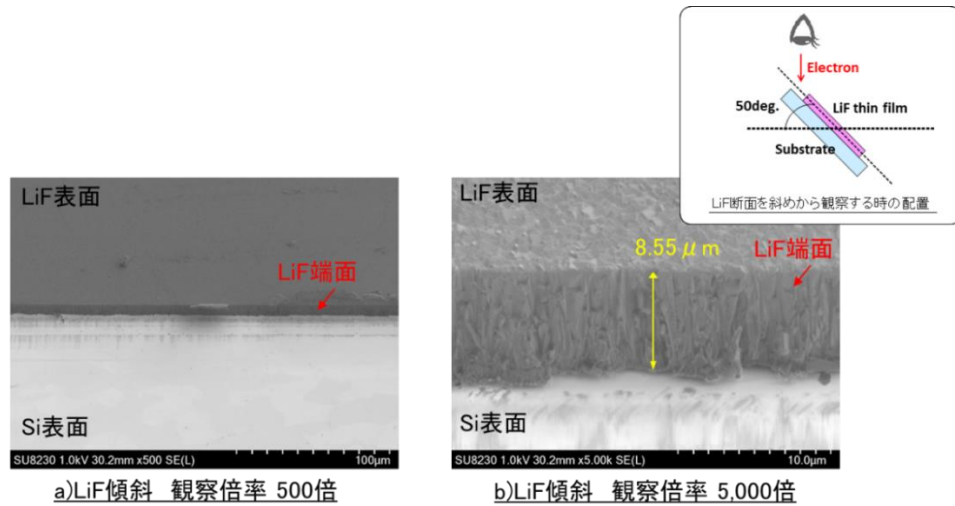


図 2-8 FE-SEM によるフッ化リチウム端面の様子

触針式粗さ計の測定では、Bruker 製の DEKTAK を使用した。荷重は 3mg、針先端の曲率半径は 12.5 μm である。触針をフッ化リチウム上に密着させた状態で、端面をまたいでシリコン基板上まで移動させていき、フッ化リチウムの膜厚を測定する。図 2-9 は触針式粗さ計によるフッ化リチウム断面の測定結果である。縦軸は膜厚であり、0 μm はシリコン基板表面を示している。横軸は、触針を移動させた距離であり、1400 μm 付近で端面を通過していることが分かる。触針式粗さ計よりフッ化リチウムの膜厚を 8.22 μm と計測できた。

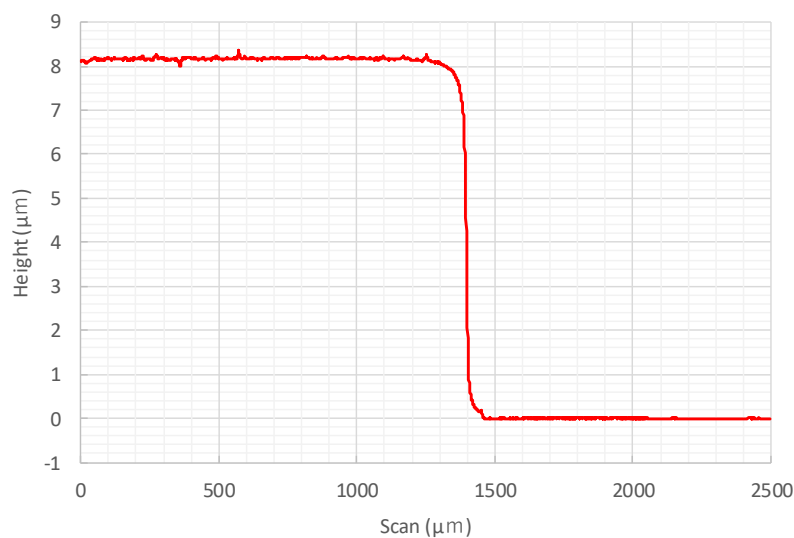


図 2-9 触針式粗さ計によるフッ化リチウム断面の測定結果

FE-SEM (8.55 μm) と触針式 (8.22 μm) で計測した厚みは 0.33 μm (4%) の差であり、両者の膜厚測定結果は妥当と言える。FE-SEM の厚みは画像から断面の最上部と最下部の長さを計測して求められる。フッ化リチウム断面を作製する時にシリコン基板に対して正確に 90 度に切断できず、4%ほど長い切片を作製した可能性がある。そのため、切片切断に依存しない触針式粗さ計の結果を以降の解析評価に利用した。

3. 新型速中性子センサーの応答特性評価

3.1. 評価方法

3.1.1. ガンマ線感度

3.1.1.1. 測定回路

実験で使用した測定回路を図 3 - 1 に示す。新型速中性子センサーの空乏層中で発生した電荷は前置増幅器(メーカー：ORTEC、型式：142B)によって積分され、主増幅器 (メーカー：ORTEC、型式：571)によって波形整形される。最後に波高分析器(以下、MCA という。メーカー：Amptek、型式：8000D)によって空乏層に付与されたエネルギーのスペクトルとして処理される。以降の実験でも本測定回路を利用する。

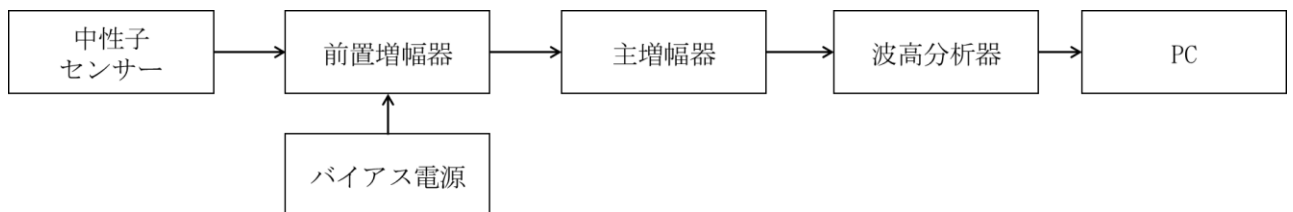


図 3 - 1 実験で使用した測定回路。測定回路は全ての実験で共通である。

3.1.1.2. エネルギー校正

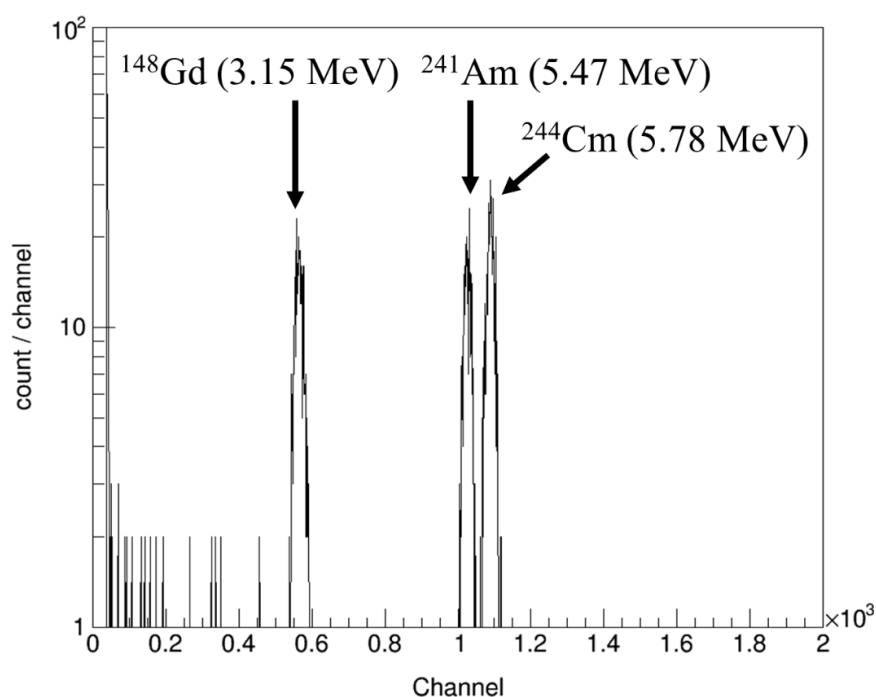
MCAで処理されたエネルギースペクトルは、エネルギー校正によりMCAチャンネルから2次荷電粒子が付与したエネルギーに変換される。さらに、計数率を照射中性子フルエンスで除することで、計測されたMCAエネルギースペクトルを中性子応答関数に変換できる。

エネルギー校正は、防衛大学校でアルファ線源を用いてMCAチャンネルとシリコン半導体の空乏層内に付与されたエネルギーの相関を計測した。アルファ線源には、ガドリニウム-148、アメリシウム-241、キュリウム-244の混合線源を使用した。線源のエネルギーリストを表3 - 1に示す。空気中でアルファ線のエネルギーが減衰しないよう反転薄型シリコンダイオードとアルファ線源をチェンバーの中に入れ、真空引きをしてから測定した。

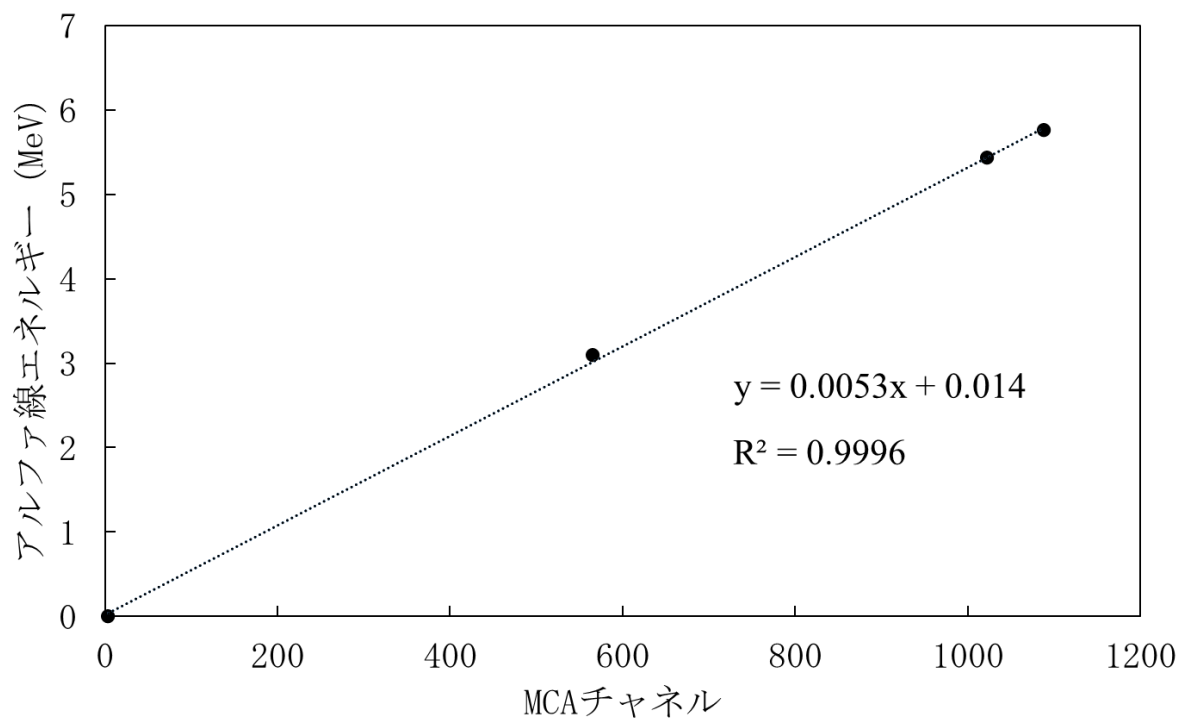
表 3 - 1 アルファ線混合線源のエネルギーリスト(2019年9月1日時点)

Source	Peak(keV)	FWHM (keV)	Activity (Bq)	Half-life
ガドリニウム-148	3153.62	19.71	339 ± 12	75 ± 3 years
アメリシウム-241	5466.47	19.97	273 ± 9	1.5785 ± 0.0024 × 10 ⁵ days
キュリウム-244	5780.77	19.82	370 ± 13	18.11 ± 0.02 years

図3 - 2(a)はアルファ線を測定したときのMCAで処理されたスペクトルである。3つのアルファ線源のピークが見て取れる。これらのピークチャンネルは各アルファ線源のエネルギーに対応している。これらのアルファ線エネルギーとピークチャンネルの相関を図3-2(b)に示した。この相関図から最小二乗法により線形近似直線を求め、MCAチャンネルとエネルギーの関係を決定した。最小二乗法における決定係数 R^2 は0.9996であった。以降、この評価したエネルギー校正の結果を利用して、MCAチャンネルを粒子エネルギーに変換した。



(a) MCAスペクトル



(b) MCAピークチャンネルとアルファ線エネルギーの相関とその線形近似

図 3 - 2 アルファ線の MCA スペクトル(a)、MCA ピークチャンネルとアルファ線エネルギーの相関図とその線形近似直線(b)

3.1.1.3. ガンマ線照射

ガンマ線照射実験は、富士電機(株)で実施した。ガンマ線源にはセシウム-137を使用し、1、10、100mSv/hの線量率を照射した。これらの線量率は、産総研で校正された電離箱で値付けされている。新型速中性子センサーは線量率に応じてガンマ線源から1.2~1.8m離し、密度が小さくガンマ線の散乱を無視できる発泡スチロールや木の板で高さを調整した。ガンマ線の照射時間は360秒とした。

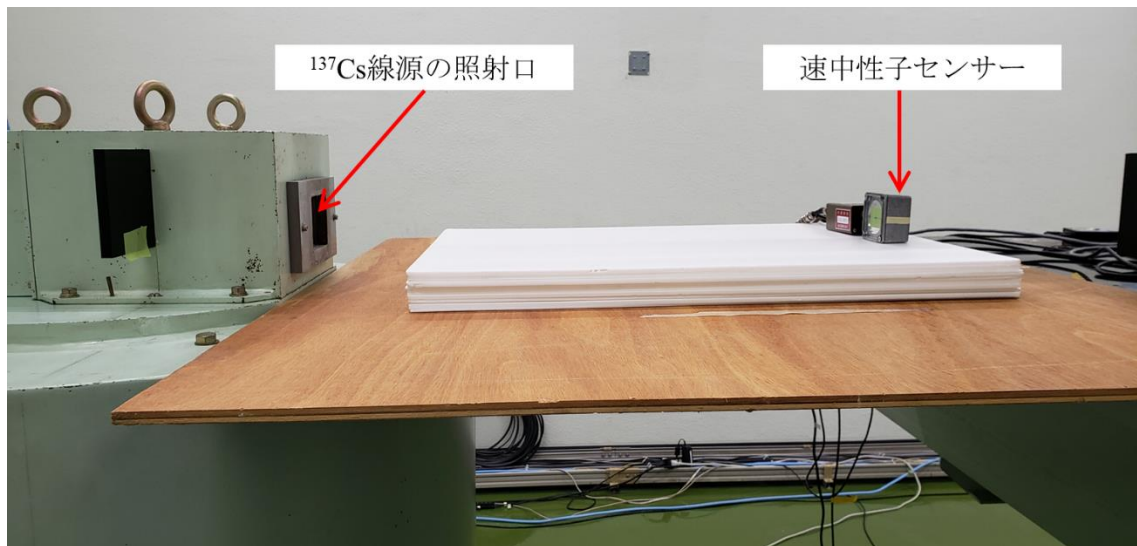


図 3 - 3 富士電機(株)で実施したセシウム-137を使ったガンマ線照射実験の様子

この実験結果からガンマ線を弁別するためのディスクリレベルを決定する。個人線量計の国際規格である IEC61526 [12]では、中性子測定に含まれるガンマ線の混在率許容に関する規定を定めていない。本研究では、中性子サーベイメータの国際規格である IEC61005 [31]に記載されているガンマ線許容限度を個人線量計のガンマ線許容限度として使用した。IEC61005 によると中性子測定で含まれるガンマ線の許容限度を以下のように規定している。

"The indication produced by a ^{137}Cs or ^{60}Co photon ambient dose equivalent rate of 10 mSv h^{-1} shall not be greater than the indicated value due to a neutron ambient dose equivalent rate of $0,1 \text{ mSv h}^{-1}$."

この要求を参照し、10mSv/hのセシウム-137を照射した時に得られた計数率と0.1mSv/hのカリホルニウム-252を照射した時に得られた中性子計数率を異なるディスクリレベルごとに比較し、カリホルニウム-252照射時の中性子計数率が大きくなるレベルをガンマ線が弁別できるディスクリレベルとして決定した。

3.1.2. 中性子照射実験

3.1.2.1. 加速器による単色中性子照射

加速器を使った実験は産総研で行った。産総研は、標準化された単色中性子を供給する場である [32]。この供給されている中性子フルエンスは欧米標準機関と相互比較が行われており、その評価値の妥当性が保証され信頼性が高い。国内線量計販売企業は、この標準中性子場を利用して販売中性子測定器の校正を実施している。測定では、565keV、780keV、1.2MeV の単色中性子を照射した。加速器によって生じた単色中性子は、10~40keV のエネルギー幅を持っている。照射室は広さ 11.5×11.5×11.5m であり、加速器のターゲットは照射室の中央に位置している。中央にターゲットを配置することで、照射室内の床面と壁面における中性子散乱を最小限にできるようになっている。

単色中性子の発生にはバンデグラフ(Van de Graff)加速器 [13]を使用した。バンデグラフ加速器は駆動する絶縁ベルトを使って電荷を運び、電極を充電し、発生した高電圧により粒子を加速する装置である。エネルギー安定度が良くエネルギーを広範囲に変えられる利点がある。565keV の単色中性子は ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応、780keV、1.2MeV の単色中性子は $\text{T}(p,n){}^3\text{He}$ 反応によって生じたものである。新型速中性子センサーはポリエチレンシート面が中性子入射方向となるようにターゲットから距離 5cm、グレーティング構造の床から高さ 1.5m に配置した。照射体系と実験時の様子を図 3 - 4 と図 3 - 5 に示す。

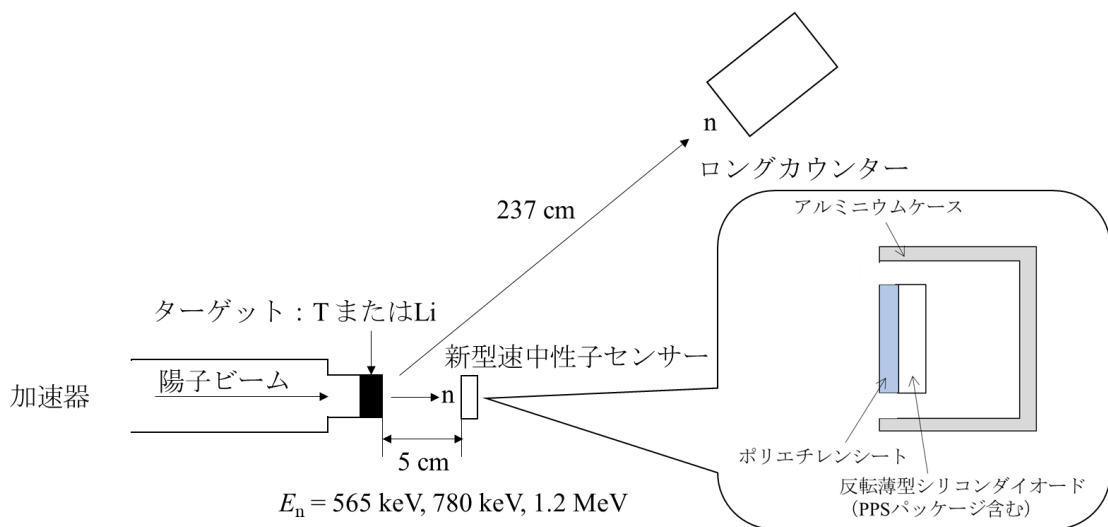


図 3 - 4 新型速中性子センサーへの単色中性子照射体系

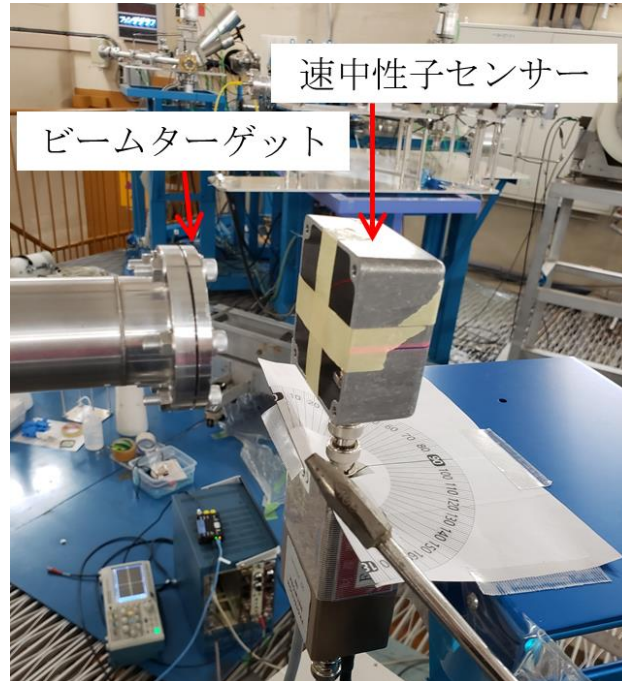


図 3 - 5 新型速中性子センサーの加速器照射実験の様子

照射中性子のフルエンス量は、565keV、780keV、1.2MeV でそれぞれ 2.0×10^7 、 8.7×10^7 、 $1.1 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 、フラックスは 2.8×10^3 、 4.8×10^4 、 $5.5 \times 10^4 (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ であった。これらのフルエンス量は、ターゲットから角度 45 度、距離 237cm に配置したロングカウンターの測定値から導出された [33]。ロングカウンターは BF_3 計数管と円筒型減速材を組み合わせたものであり、1 方向からの中性子を検出する。 BF_3 計数管は十分に長く、エネルギーの高い中性子でも減速してから計数するため計数効率が中性子エネルギーに依存せず、平坦なエネルギー応答特性が得られる。中性子フルエンスを測定するのに使用される。

加速器による単色中性子照射では、入射陽子線とターゲット支持体との核反応によりガンマ線が発生する。ガンマ線による応答を除外するために、ポリエチラジエータ有りの応答関数 $R_{\text{poly}}(E')$ からポリエチレンラジエータ無しの応答関数 $R_{\text{non}}(E')$ を差し引く。応答関数 $R_{\text{poly}}(E')$ はターゲットで発生するガンマ線と中性子により検出された事象から構成されるが、 $R_{\text{non}}(E')$ はポリエチレンラジエータがないためターゲットから発生するガンマ線により検出された事象のみから構成されるためである。中性子エネルギー応答関数 $R(E')$ を式 3 - 1 に示す。

$$R(E') = R_{\text{poly}}(E') - R_{\text{non}}(E') \quad (\text{式 3 - 1})$$

E' は空乏層内に付与された荷電粒子のエネルギーである。照射中性子エネルギー E に対する検出効率 $\varepsilon(E)$ は、式 3 - 2 に示す通り、得られた応答関数をガンマ線弁別のためのディスクリレベル E_{th} 以上で積分することで求められる。

$$\varepsilon(E) = \int_{E_{\text{th}}} R(E') dE' \quad (\text{式 3 - 2})$$

3.1.2.2. 中性子線源照射

カリホルニウム-252 線源の照射実験を産総研で実施した。照射体系を図 3 - 6 に示す。照射室は単色中性子照射実験と同じである。新型速中性子センサーは、ポリエチレンシート面を線源方向に向け、線源から距離 30cm、グレーティング構造の床から 1.5m に配置した。カリホルニウム-252 の線源強度は 3.3GBq であり、照射時間は 52009 秒で、フルエンス量は $5.7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ であった。カリホルニウム-252 は連続エネルギーのスペクトル [34]を持っているため、カリホルニウム-252 線源の平均フルエンスエネルギーである 2.1MeV に対する応答として評価した。ガンマ線弁別のためのディスクリレベルは単色中性子と共通であり、応答関数をディスクリレベル以上で積分し、検出効率を評価した。

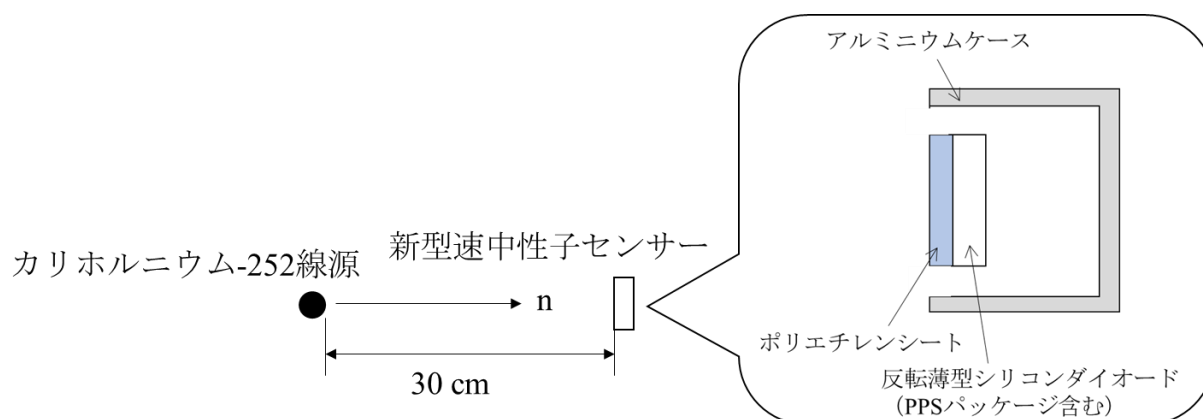


図 3 - 6 新型速中性子センサーへのカリホルニウム-252 線源照射体系

3.1.3. モンテカルロシミュレーション

新型速中性子センサーの応答関数をモンテカルロシミュレーションにより評価した。シミュレーションコードには PHITS3.020 (Particle and Heavy Ion Transport code System version 3.020) [35]を、核反応断面積ライブラリーには JENDL4.0 (Japanese Evaluated Nuclear Data Library version 4.0) [28]を使用した。

図 3 - 7 は、モンテカルロシミュレーションにおける評価体系である。中性子線源は 6×6cm の平行ビームとし、実験で使用したアルミニウムケースを含む新型速中性子センサーを包括する大きさとしている。新型速中性子センサーは、ポリエチレンシート面を中性子照射面に向けて配置した。照射中性子は、500keV～15MeV の単色中性子とした。

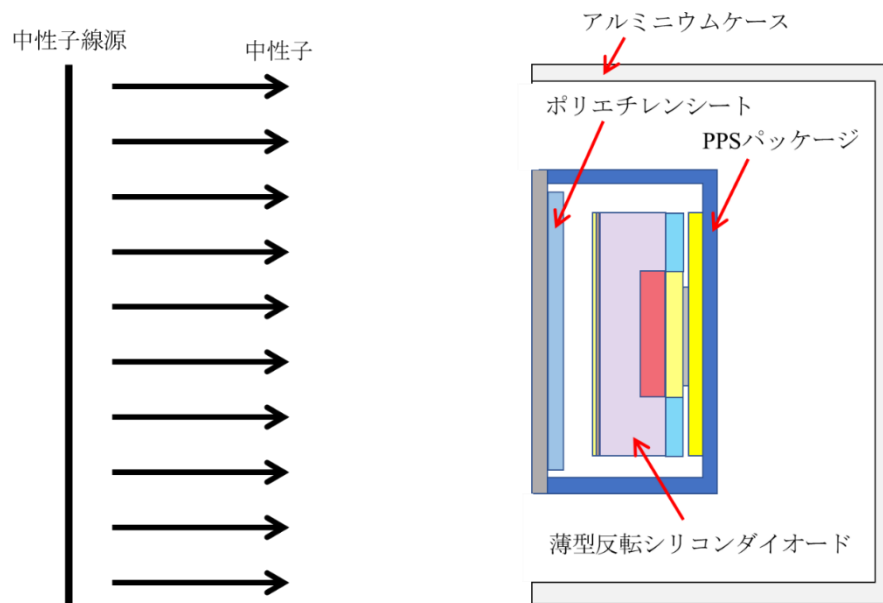


図 3 - 7 モンテカルロシミュレーションによる中性子エネルギー応答関数の評価体系

評価には、PHITS 内の計算コードである T-deposit を使用した。T-deposit は、指定領域で放射線による付与エネルギーを計算するタリー（シミュレーション結果をスコアする手段）である。本シミュレーションでは、指定領域に反転薄型シリコンダイオードの空乏層領域を設定し、反跳陽子、電子、反跳核による付与エネルギーを計算した。シミュレーションで輸送計算を打ち切りとするエネルギーは、中性子、反跳陽子、電子、反跳核で、それぞれ 0.01eV、1keV、0.1MeV、1keV とした。荷電粒子の減速は、PHITS 内で阻止能計算モデル ATIMA (ATomic Interaction with Matter) [36]により計算される。ガンマ線や電子の輸送は、PHITS 内で電磁カスケード計算コード EGS5 (Electron Gamma Shower version 5) [37]により計算される。T-deposit から得られた応答関数 $R(E')$ は、式 3 - 3 に示す通りガンマ線弁別のためのディスクリレベル E_{th} 以上で積分し、照射中性子エネルギー E に対する検出効率 $\varepsilon(E)$ として評価した。

$$\varepsilon(E) = \int_{E_{th}} R(E') dE' \quad (\text{式 3 - 3})$$

E' は新型速中性子センサーに付与された 2 次荷電粒子のエネルギーである。

3.2. 結果と考察

3.2.1. ガンマ線感度

新型速中性子センサーにセシウム-137 線源を照射した結果を図 3 - 8 に示す。縦軸は照射線量率で規格化した計数率である。横軸はガンマ線照射により発生した 2 次荷電粒子が空乏層に付与したエネルギーである。照射線量率は、1、10、100mSv/h である。比較のため、反転薄型シリコンダイオードを使用した新型速中性子センサー(Novel Sensor)に加えて、100mSv/h を照射したときの従来型速中性子センサー(Previous Sensor)の結果も示す。

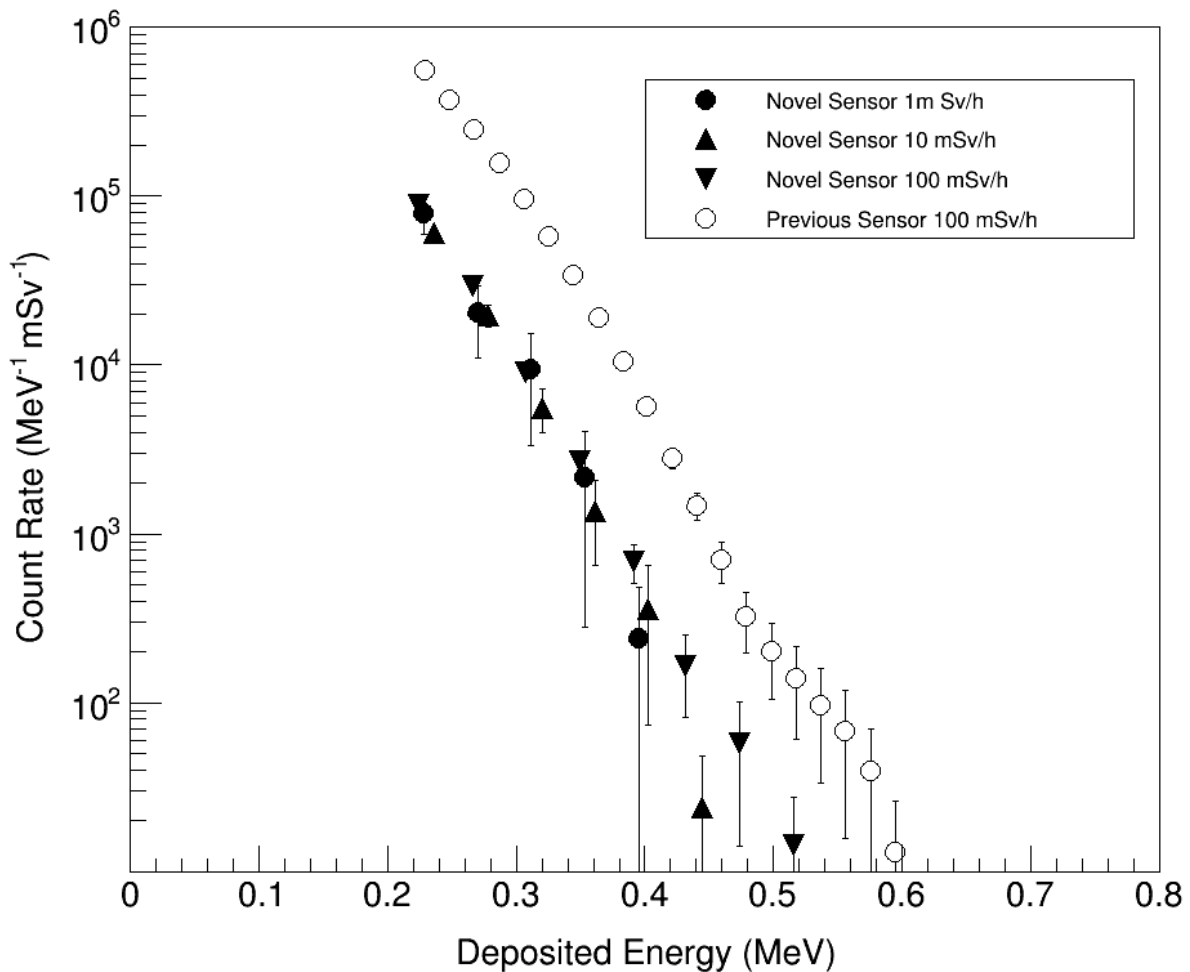


図 3 - 8 新型速中性子センサー(Novel Sensor)と従来型速中性子センサー(Previous Sensor)の異なる線量率のセシウム-137 ガンマ線源に対する応答関数

新型速中性子センサーにおける 400keV 以下の結果では、線量率依存性が小さい応答関数を示している。400keV 以上では、10mSv/h と 100mSv/h 照射時のみ計数が確認できた。また、セシウム-137 から放出される 662keV のガンマ線は、主にコンプトン散乱によって電子を生成させるが、この時に発生するコンプトン電子の最大エネルギーは約 480keV である。したがって 480keV 以上のエネルギーで計数が見られるのは、光電効果やパイルアップ効果、ファネリング効果 [26]によるものと考えられる。

線量率 100mSv/h においてディスクリレベルを 200、300、400、500keV としたときのガンマ線検出効率を表 3-2 に示す。新型速中性子センサーのガンマ線検出効率は、従来型速中性子センサーのガンマ線検出効率の 7.1%~13%となり、ガンマ線感度を低下することができた。これは、反転薄型シリコンダイオードの薄型化による効果であり、空乏層を除くシリコン母体部分が減少したことでファネリング効果による空乏層の広がりを抑えることができたためである。

表 3-2 新型速中性子センサーと従来型速中性子センサーのセシウム-137 ガンマ線に対する検出効率

ディスクリレベル (keV)	ガンマ線検出効率(mSv ⁻¹)		新型センサー /従来型センサー
	新型センサー	従来型センサー	
200	$(6.1 \pm 0.0) \times 10^3$	$(4.6 \pm 0.0) \times 10^4$	13%
300	$(3.7 \pm 0.1) \times 10^2$	$(4.0 \pm 0.0) \times 10^3$	9.2%
400	$(1.4 \pm 0.1) \times 10^1$	$(1.7 \pm 0.0) \times 10^2$	8.2%
500	$(6.0 \pm 2.4) \times 10^{-1}$	$(8.5 \pm 0.7) \times 10^0$	7.1%

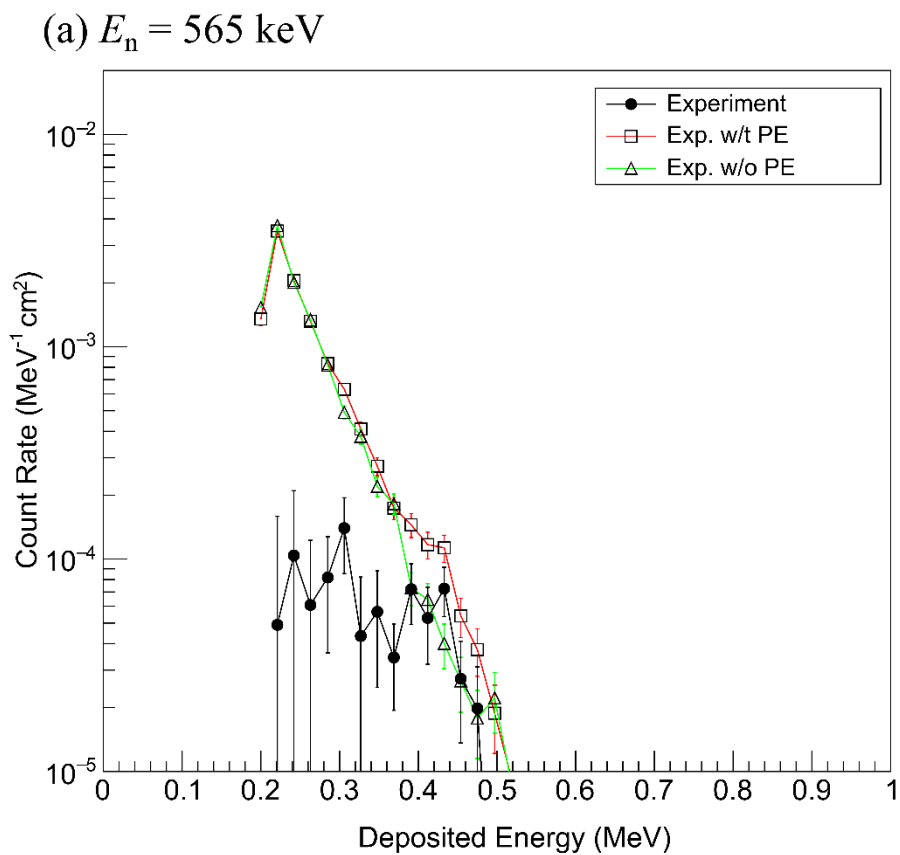
続いて、ガンマ線弁別のためのディスクリレベルを決定する。前述の通り中性子個人線量計の国際規格 IEC61526 では中性子測定においてガンマ線許容限度が規定されていない。そこで本研究では、中性子サーベイメータの国際規格 IEC61005 を参照し、ガンマ線を弁別するためのディスクリレベルを決定した。IEC61005 によると、10mSv/h のセシウム-137 線源を照射したときに得られる線量率(計数率)が中性子 0.1mSv/h を照射したときに計測される線量率(計数率)より低くなることを規格として定義しており、これを満たすようにディスクリレベルを決定する。中性子の測定には、カリホルニウム-252 線源を使用した。ディスクリレベルを 350keV、400keV、450keV としたときのセシウム-137 線源によるガンマ線とカリホルニウム-252 線源による中性子に対する計数率を表 3-3 に示す。結果、400keV 以上では、ガンマ線計数率よりも中性子計数率のほうが大きく、ガンマ線弁別のためのディスクリレベルは 400keV に決定された。なお、ディスクリレベル 450keV では、照射条件下においてガンマ線に対する計数率を確認できなかった。

表 3-3 新型速中性子センサーのガンマ線感度と中性子感度の比較

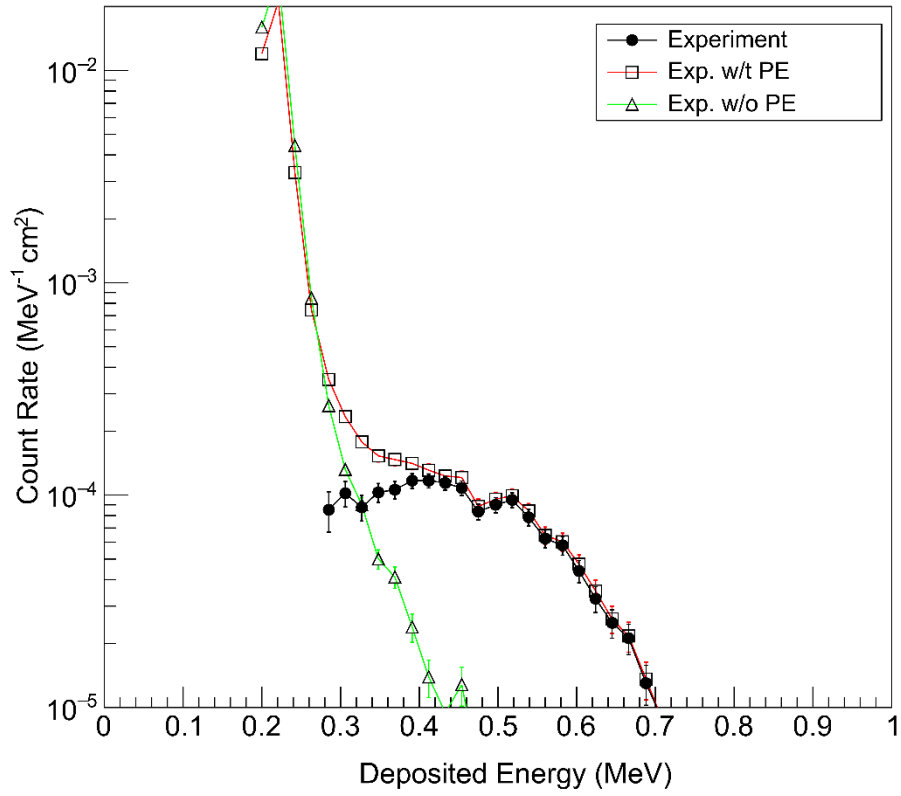
ディスクリレベル (keV)	計数率 (s ⁻¹)	
	ガンマ線 (セシウム-137)	中性子(カリホルニウム-252)
350	$(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-1}$	$(2.3 \pm 0.0) \times 10^{-2}$
400	$(1.4 \pm 0.6) \times 10^{-2}$	$(2.1 \pm 0.0) \times 10^{-2}$
450	0.0	$(2.1 \pm 0.0) \times 10^{-2}$

3.2.2. 中性子照射実験による評価

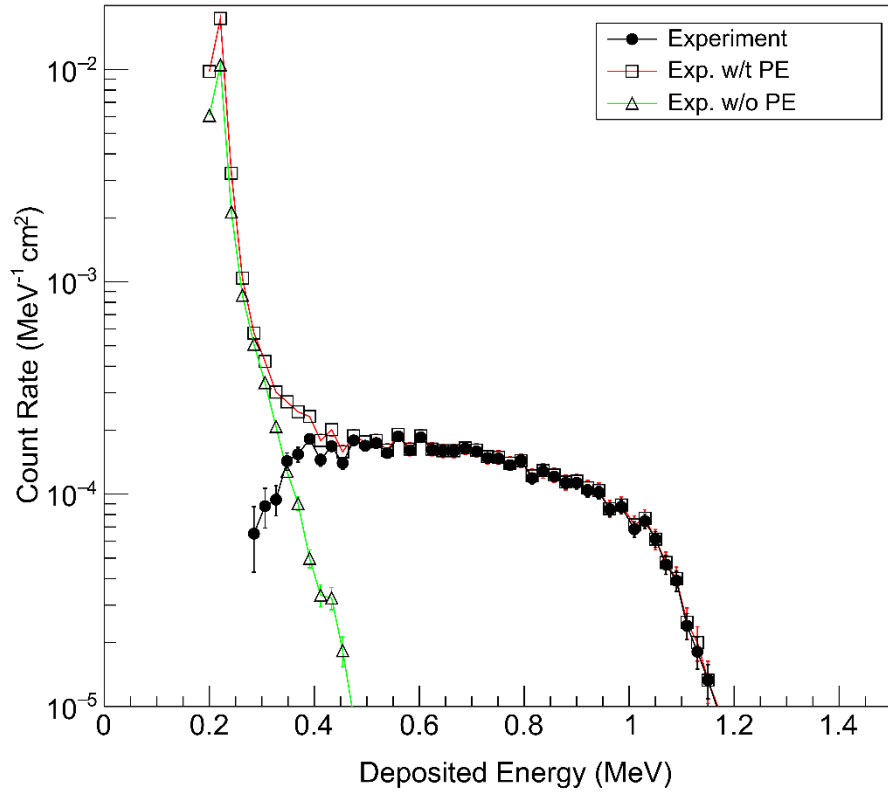
新型速中性子センサーに単色中性子 565keV、780keV、1.2MeV 及びカリホルニウム-252 ($\bar{E}_n=2.1\text{MeV}$) を照射し、応答関数を評価した。各中性子エネルギーにおける応答関数を図 3-9 に示す。縦軸は中性子フルエンス当たりの計数率、横軸は新型速中性子センサーの空乏層に付与された 2 次荷電粒子のエネルギーである。各図中の白四角付赤実線(Exp. w/t PE)はポリエチレンラジエータ付新型速中性子センサーで計測して得られた応答関数、白三角付黄緑実線(Exp. w/o PE)はポリエチレンラジエータを外した新型速中性子センサーで計測して得られた応答関数であり、前者から後者を差し引いた応答関数が黒丸付実線(Experiment)で示されている。各測定点の誤差棒は、計測値の統計的な誤差(1σ)を示す。



(b) $E_n = 780$ keV



(c) $E_n = 1.2$ MeV



(d) ^{252}Cf ($\bar{E}_n = 2.1 \text{ MeV}$)

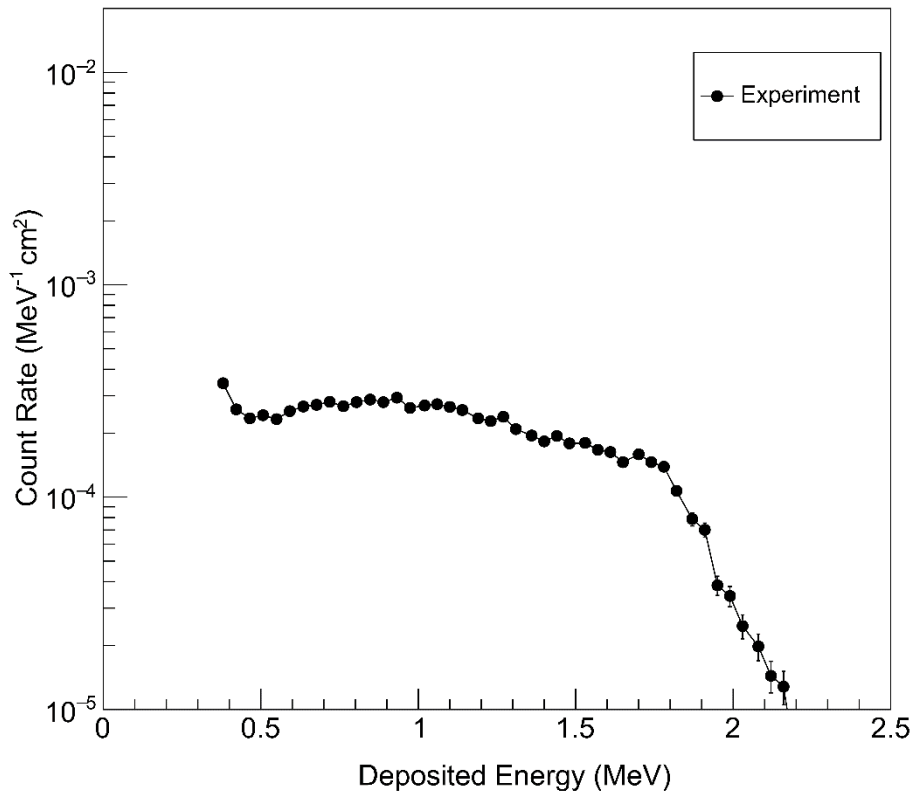


図 3 - 9 (a) 565 keV, (b) 780 keV, (c) 1.2 MeV 及び(d) カリホルニウム-252($\bar{E}_n = 2.1\text{MeV}$)照射時の応答関数(実験)

低エネルギーで応答関数が得られていないのは、ガンマ線成分の差し引きによるためであり、ガンマ線成分によって中性子応答は埋もれている。また、565keVでは、ガンマ線成分を差し引いたことで統計誤差が大きくなっている。中性子照射により反跳陽子の最大エネルギーをエッジとした応答関数が得られた。最大エネルギー E_{max} は照射中性子のエネルギー E_n よりも低い値である。これはポリエチレンシートと空乏層の間にある空気層や反転薄型シリコンダイオードの不感層で反跳陽子のエネルギーが減少したためである。反跳陽子は中性子とラジエータの弾性散乱により発生するため、反跳陽子のエネルギー損失がなければ、最大エネルギーは照射中性子のエネルギーに等しくなる。NIST Standard Reference Database 124 [38]を用いて、実験体系の空気層 1mm、不感層 0.7 μm における陽子エネルギー損失を計算したところ、表 3-4 に示す通り実験結果に対して-12%~+38%で一致した。カリホルニウム-252 の測定において、反跳陽子の最大エネルギーがカリホルニウム-252 の平均エネルギー2.1MeV よりも大きな値となっているのは、カリホルニウム-252 が最大 15MeV の連続エネルギー分布を持つためである。

表 3 - 4 新型速中性子センサーで検出した反跳陽子の最大エネルギーとエネルギー損失

中性子エネルギー E_n	最大エネルギー E_{max}	エネルギー損失 $E_n - E_{max}$ (実測値)	エネルギー損失 (計算値)
565keV	480keV	85keV	87keV
780keV	700keV	80keV	70keV
1.2MeV	1.16MeV	40keV	55keV
2.1MeV (カリホルニウム-252)	2.15MeV	-50keV	-

表 3 - 5 に示すのは、565keV、780keV、1.2MeV の単色中性子に対する新型速中性子センサーと従来型速中性子センサーのエネルギー損失である。従来型速中性子センサーのエネルギー損失は、空気層を 1mm、不感層を 2.1 μ m とし、NIST Standard Reference Database 124 の陽子飛程データを用いて計算した値である。新型速中性子センサーのエネルギー損失は薄型化の効果により従来型速中性子センサーのエネルギー損失に対して 35～53%となり、反跳陽子のエネルギー損失を半分以下に抑えることができた。

表 3 - 5 新型速中性子センサーと従来型速中性子センサーのエネルギー損失

中性子エネルギー E_n	新型センサー ($E_n - E_{max}$)	従来型センサー ($E_n - E_{max}$)	新型センサー / 従来型センサー
565keV	85keV	189keV	45%
780keV	80keV	150keV	53%
1.2MeV	40keV	113keV	35%

図 3 - 10 に応答関数を 400keV のディスクリレベル以上で積分した新型速中性子センサーの検出効率を示す。縦軸は検出効率であり、照射中性子フルエンスあたりのカウント数を示す。横軸は照射中性子のエネルギーである。比較のために新型速中性子センサー(Novel Sensor)に加え、従来型速中性子センサー(Previous Sensor)の検出効率も示す。

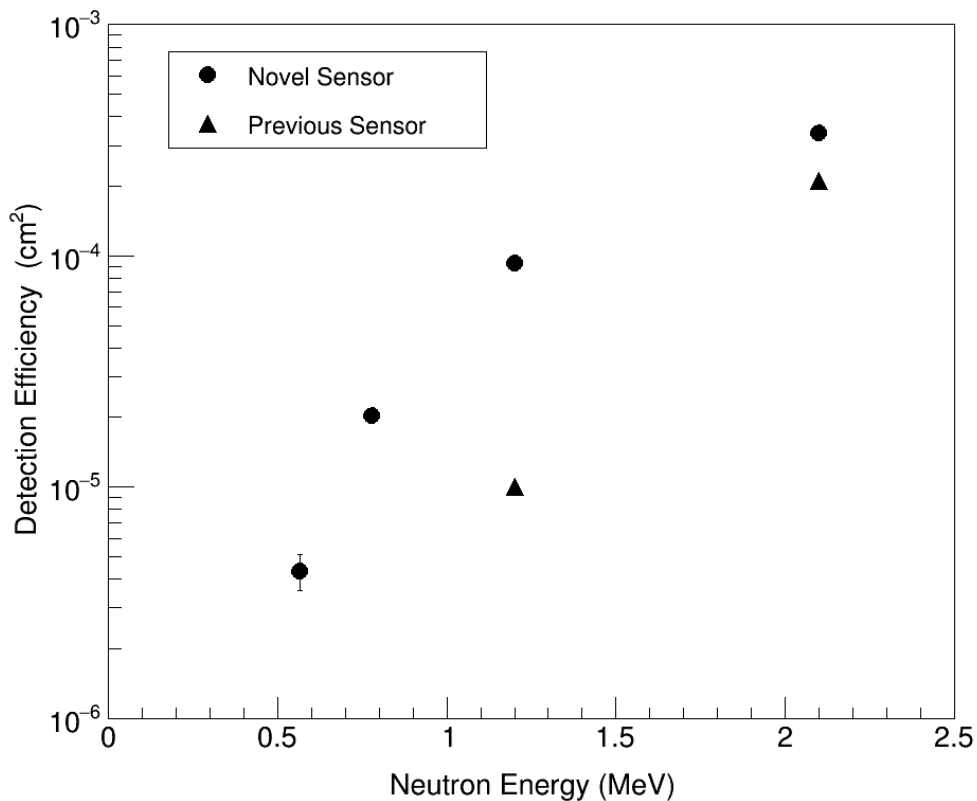


図 3 - 10 新型速中性子センサー(Novel Sensor)と従来型速中性子センサー(Previous Sensor)の速中性子に対する検出効率の実験結果

図 3 - 10 より、565keV と 780keV において、従来型速中性子センサーでは検出不可であった検出効率を得ることができた。また、1.2MeV とカリホルニウム-252 においても従来型速中性子センサーよりも検出効率が向上した。これは反転薄型シリコンダイオードの 2 つの効果によるものである。1 つ目は、ガンマ線感度の低下である。シリコンダイオードを薄くし、空乏層以外のシリコン母体部分を減らしたことでファネリングによるガンマ線感度が低下し、ディスクリレベルを 400 keV まで下げられた。これにより中性子の測定下限エネルギーを低くすることができた。2 つ目は、反跳陽子のエネルギー損失を減らしたことである。反跳陽子が入射する不感層を薄くすることでエネルギー損失を減らし、よりエネルギーが低い陽子も検出できるようになった。これにより検出効率が向上した。図 3 - 11 に反転薄型シリコンダイオードを利用した波高分布の改善効果を示す。ガンマ線感度低下がもたらすガンマ線波高分布の低下と反跳陽子のエネルギー損失低下がもたらす応答関数の最大エネルギーの上昇を示す。

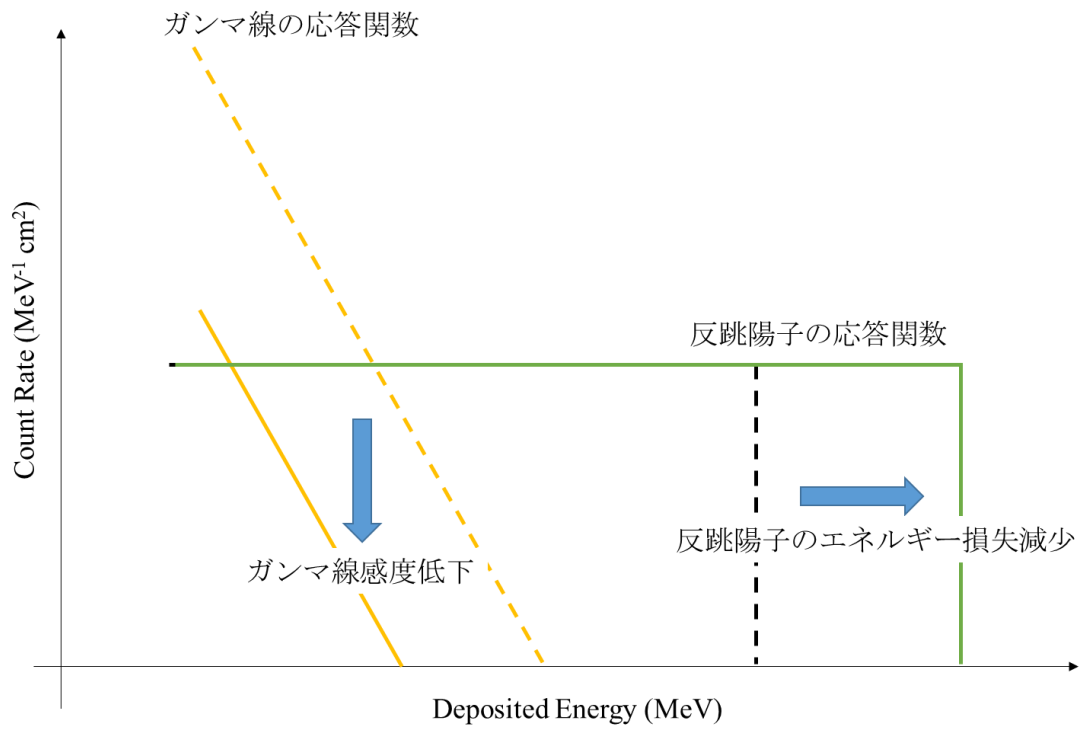
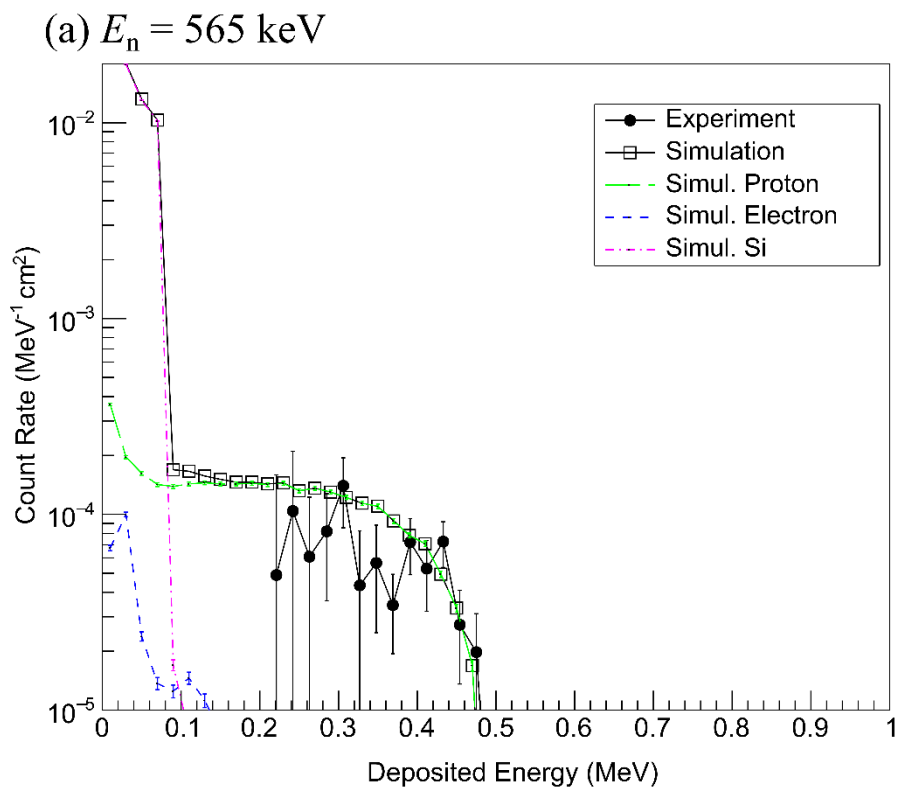


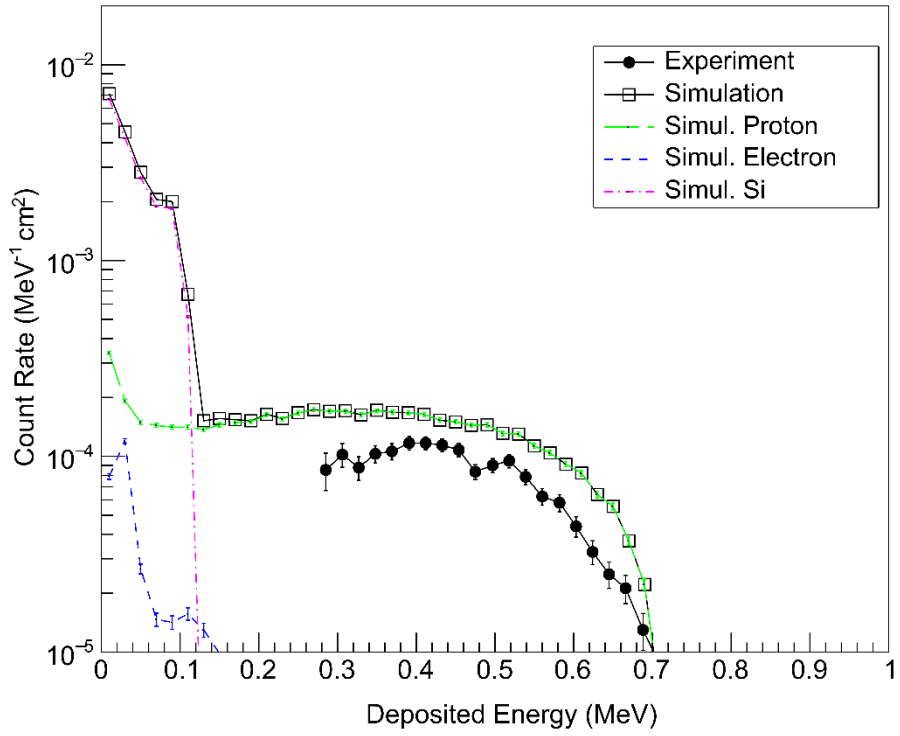
図 3 - 11 反転薄型シリコンダイオード利用による応答関数の変化。
ガンマ線波高分布の低下と反跳陽子のエネルギー損失減少。

3.2.3. モンテカルロシミュレーションによる評価

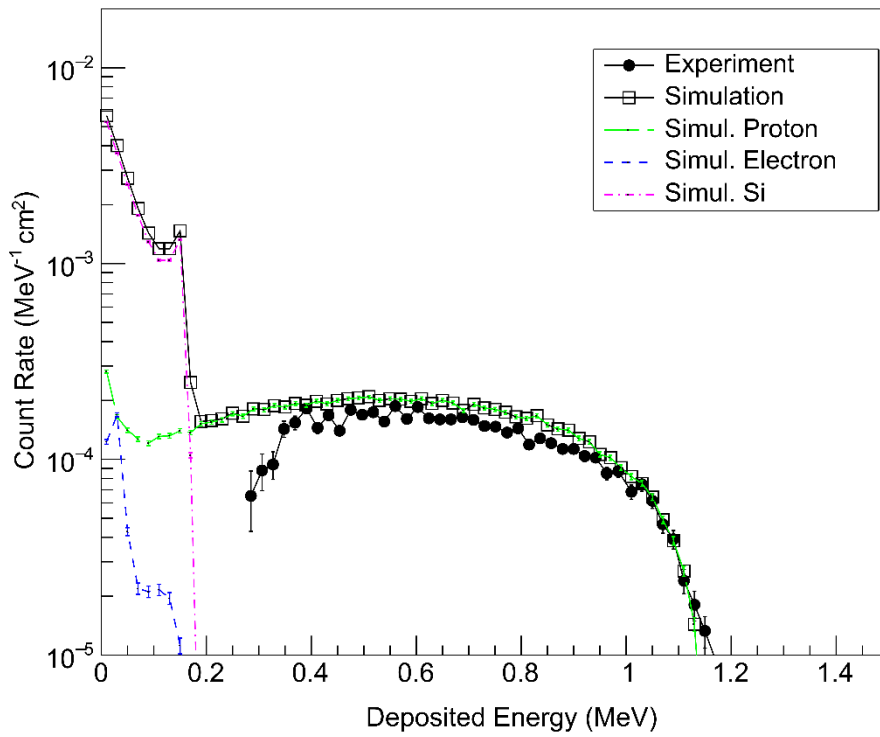
単色中性子及びカリホルニウム-252 線源を照射したときの応答関数をモンテカルロシミュレーションに基づいた PHITS コードにより評価した。結果を図 3-12 に示す。シミュレーションでは、加速器ターゲットで発生したガンマ線を考慮していないため、結果は単色中性子を検出した応答関数を示している。すなわち中性子起因の事象のみである。単色中性子エネルギーは実験と同じ 565keV、780keV、1.2MeV である。シミュレーション結果には、中性子により生成された 2 次荷電粒子の応答関数も記号なし点線で示している。縦軸は単位中性子フラックス当たりの計数率、横軸は空乏層に付与された粒子エネルギーである。



(b) $E_n = 780$ keV



(c) $E_n = 1.2$ MeV



(d) ^{252}Cf ($\bar{E}_n = 2.1 \text{ MeV}$)

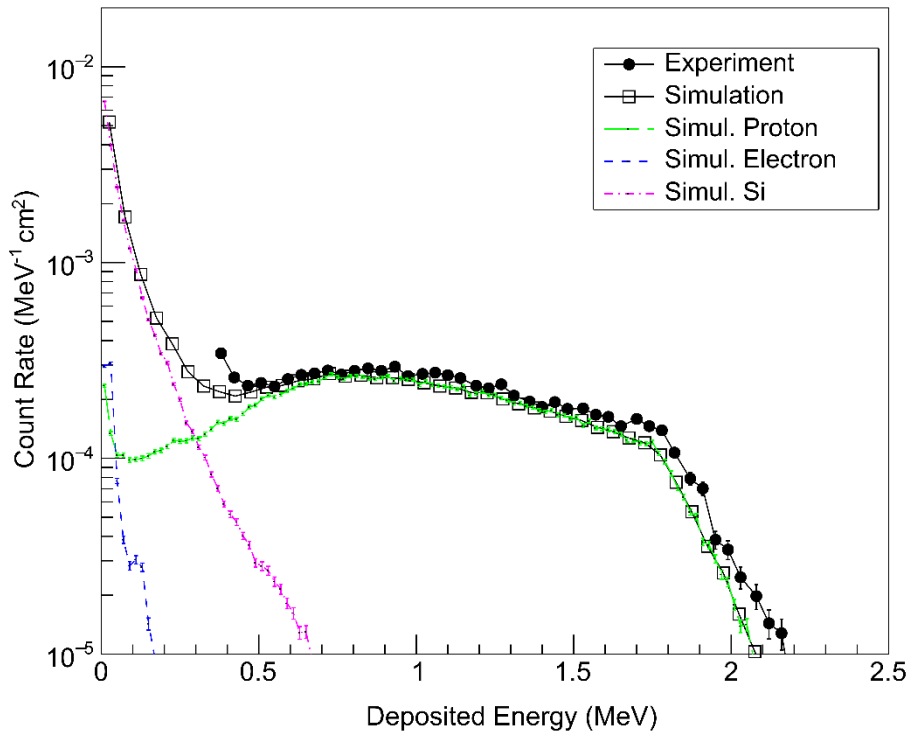


図 3 - 12 (a) 565 keV, (b) 780 keV, (c) 1.2 MeV 及び(d) カリホルニウム-252($\bar{E}_n = 2.1\text{MeV}$)照射時の応答関数。シミュレーションと実験結果との比較。

シミュレーション結果より、中性子に対する応答関数には、反跳陽子の他に中性子が反跳したシリコン原子核や中性子により発生した電子から構成されていることがわかる。但し、これらの2次荷電粒子のうち電子とシリコン原子核のエネルギーは低く、400keV以下が大半であり、ディスクリレベル400keV以上の応答関数は反跳陽子によって主に構成されている。シミュレーションで評価された応答関数のエッジである最大エネルギー $E_{\text{max}}(\text{simul.})$ は、表3-6に示す通り、実験結果の最大エネルギー $E_{\text{max}}(\text{exp.})$ に対して3%の精度で一致した。連続領域は、780keVを除き、統計誤差を含めて $\pm 20\%$ で一致した。この差は、ポリエチレンシートの厚さや、空乏層領域の深さ、空気層の厚さなど、いくつかの不確かさが要因となり生じたものと考えられる。また、単色中性子の照射実験において多くの統計量を得るためにターゲットからの距離を5cmとしたため、新型速中性子センサーを格納したアルミニウムケースにおいて中性子散乱が起これ、見積もったフルエンス量に誤差が生じていた可能性も考えられる。780keVのシミュレーション結果は、実験値に対して47%過大評価となっている。これは、上記で述べた不確かさに加え、780keVが産総研において標準化されていないエネルギーであるために、他の単色中性子のフルエンスよりも不確かさが大きかった可能性が考えられる。カリホルニウム-252線源の照射では、粒子エネルギー1.7MeV以上でシミュレーション結果は過少評価である。これは、エネルギーが高い中性子により反跳された陽子がファネリング現象により空乏層を拡張し、より大きなエネルギーを収集したためと考えられる。ガンマ線感度の評価結果を見てわかる通り、シリコンダイオードの薄型化によりファネリングの効果は低下したが、空乏層以外のシリコン母体部が完全になくなったわけではないため、エネルギーが高い中性子に対しては、ファネリング現象が生じたと考えられる。ファネリング現象をシミュレーションに組み込むためには、シリコンダイオード内の電場空間分布を正確に模擬しなければならない。現

段階では、明確な境界を有する空乏層での電荷収集のみを取り扱っているため、完全に電荷収集を再現できていない可能性があると考える。

表 3 - 6 新型速中性子センサーで検出した反跳陽子の最大エネルギーの実験値とシミュレーション評価値

中性子エネルギー E_n	E_{\max} (simul.)	E_{\max} (exp.)	Simulation / experiment
565 keV	470 keV	480keV	98%
780 keV	700 keV	700keV	100%
1.2 MeV	1.13 MeV	1.16MeV	97%
2.1 MeV (カリホルニウム-252)	2.08 MeV	2.15MeV	97%

図 3 - 13 に示すのは、実験結果とシミュレーション結果より得た新型速中性子センサーの中性子に対する検出効率である。縦軸は検出効率を示し、横軸は照射した中性子エネルギーを示す。縦誤差棒は計数値の統計誤差(1 σ)である。

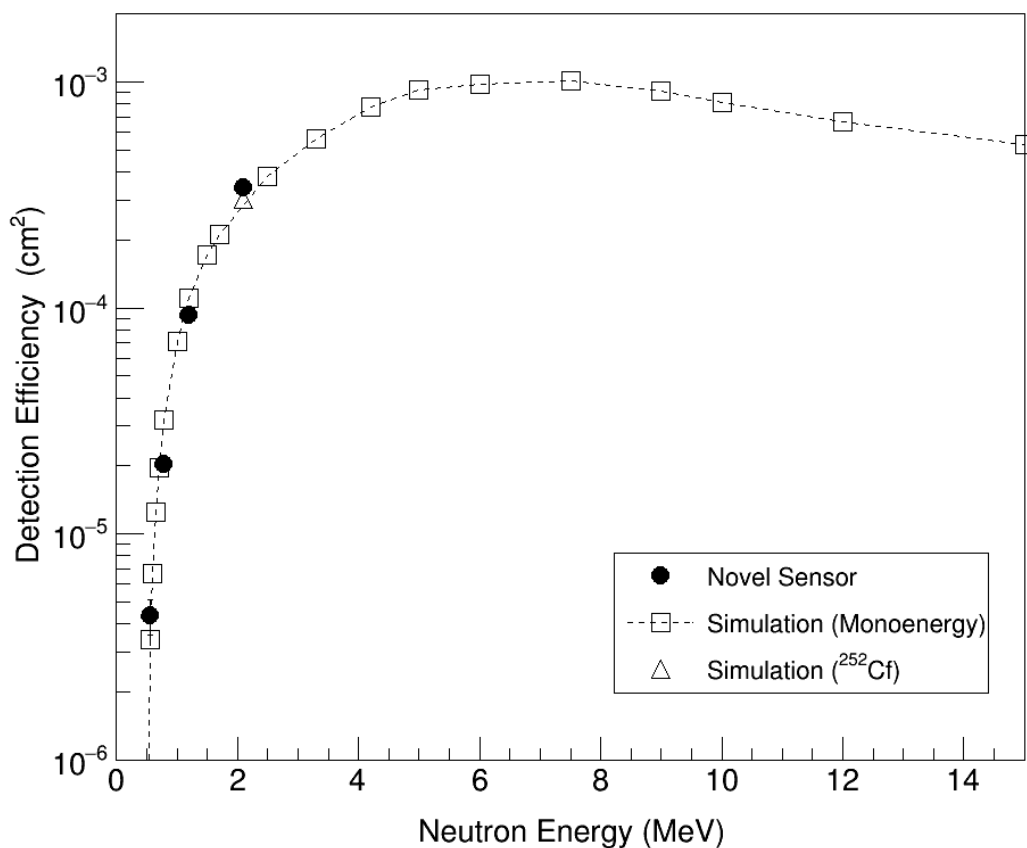


図 3 - 13 新型速中性子センサーの中性子に対する検出効率。黒丸が実験値、白四角付き破線がシミュレーション結果、白三角形がカリホルニウム-252 中性子源のシミュレーション結果である。

図 3 - 13 よりシミュレーション結果は、単色中性子 780keV を除き $\pm 21\%$ で実験結果を再現できた。780keV では、実験結果に対して 57%過大評価となった。これらの差は、応答関数の評価で考察した不確

かさによるものと同じである。シミュレーション結果は実験結果を再現できており、幅広いエネルギー(500keV~15MeV)を有する中性子に対する検出効率を導出することができた。

シミュレーション結果の検出効率は 500keV 付近から急激に大きくなっている。中性子を検出可能な下限エネルギーは 500keV であり、その時の検出効率は $1.6 \times 10^{-7} \text{cm}^2$ であった。検出効率は、中性子のエネルギーとともに大きくなり、7.5MeV において最大値 $1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ となった。7.5MeV 以上のエネルギーでは、中性子エネルギーの増加とともに検出効率は低下している。これは、エネルギーが高い反跳陽子は空乏層を突き抜け、一部のエネルギーしか付与しないようになるためである。図 3 - 14 に示すのは、中性子エネルギー 5MeV、7.5MeV、10MeV、15MeV の応答関数である。中性子エネルギー 5MeV の応答関数で 0.7MeV 付近に見られるピークは、エネルギーが 7.5、10、15MeV と上昇するにつれて 0.5、0.4、0.3MeV と低下している。これは、中性子エネルギーの増加とともに反跳陽子のエネルギーが増加し、阻止能が低下するため、空乏層に付与されるエネルギーが減少することが原因である。7.5MeV 以上では、空乏層を突き抜ける成分の付与エネルギーがディスクリレベルの 400keV 以下となるために、7.5MeV 以上の中性子に対して検出効率が低下することとなる。

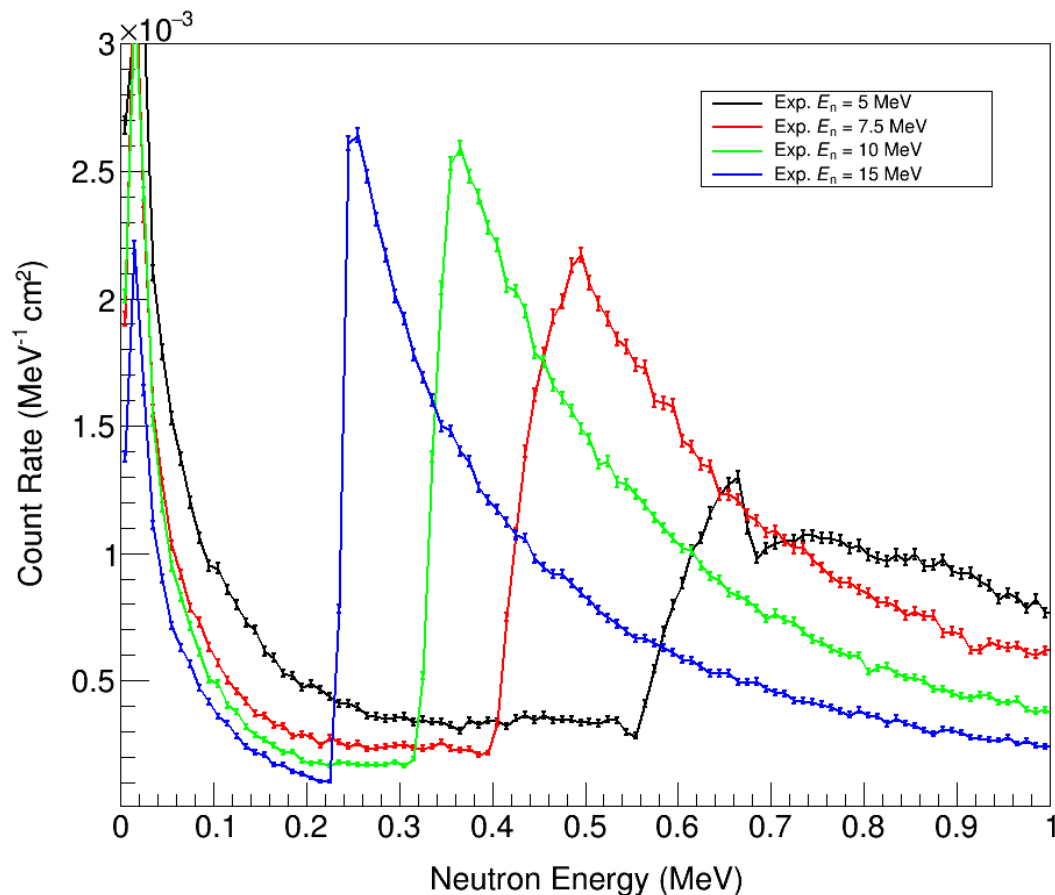


図 3 - 14 低エネルギー波高領域における応答関数の中性子エネルギーによる変化

以上の結果より、反転薄型シリコンダイオードを使用することで、ガンマ線感度と反跳陽子のエネルギー損失を低下させ、中性子を検出可能な最低下限エネルギーを 500keV まで低下できた。シミュレーションにより 500keV 以上の中性子に対する検出効率を評価できることを確認できた。

3.2.4. 1cm 線量当量換算係数に対する評価

3.2.4.1. 1cm 線量当量換算係数との比較

新型速中性子センサー(Novel Sensor)と従来型速中性子センサー(Previous Sensor)の検出効率、及び 1cm 線量当量換算係数($H_p(10)$)を図 3 - 15 に示す。1cm 線量当量換算係数は、比較のために新型速中性子センサーの単色中性子 1.2MeV に対する実験結果で規格化した値である。また、この 1cm 線量当量換算係数に対する新旧速中性子センサー検出効率比率を表 3 - 7 に示す。新型速中性子センサーと従来型速中性子センサーの検出効率をそれぞれ $\varepsilon(\text{novel})$ 、 $\varepsilon(\text{previous})$ とする。

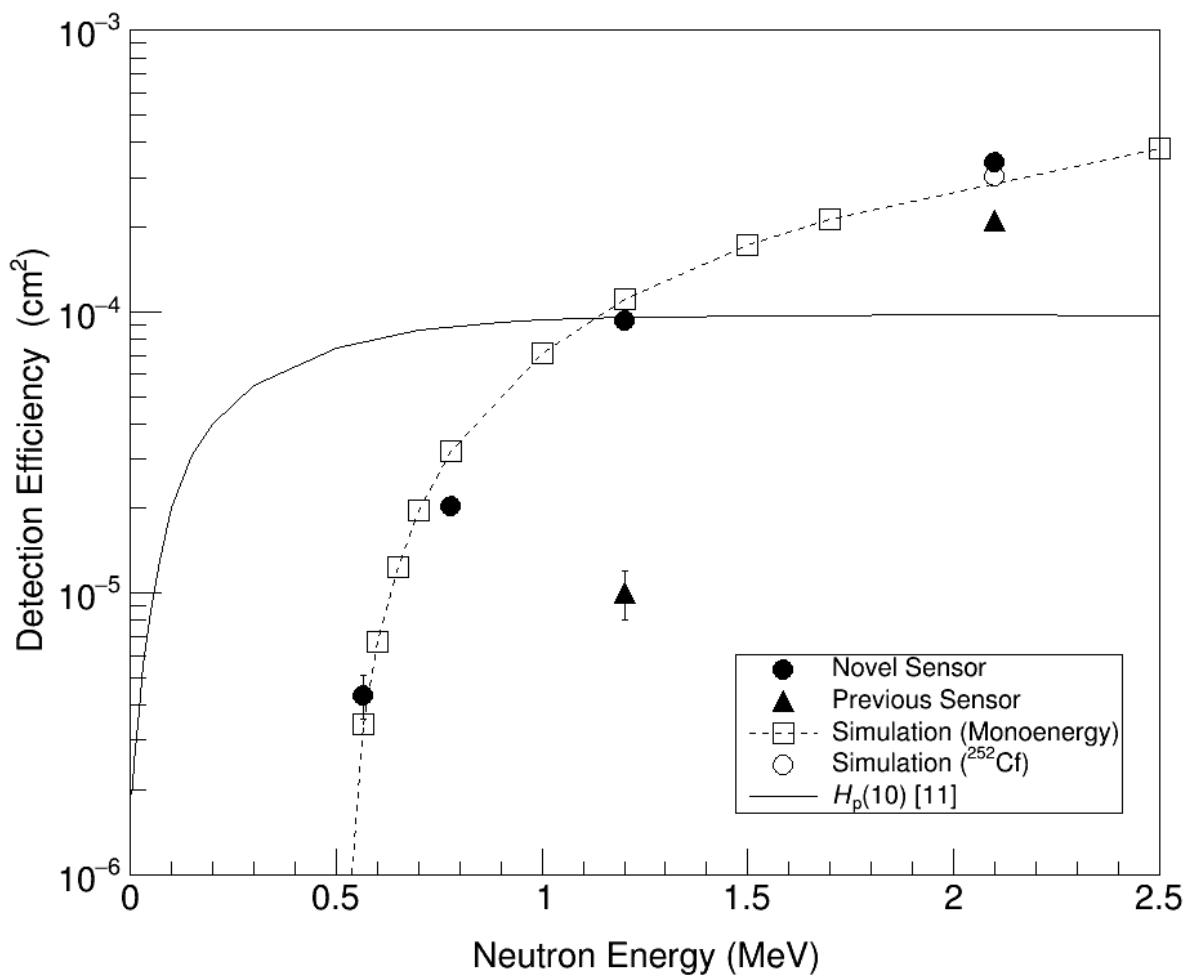


図 3 - 15 新旧速中性子センサーの中性子に対する検出効率の実験結果と新型中性子センサーの検出効率のシミュレーション結果と単色中性子 1.2MeV の実験結果で規格化した 1cm 線量当量換算係数($H_p(10)$) [11]

表 3 - 7 新旧速中性子センサーの検出効率と 1cm 線量当量換算係数との比

中性子エネルギー E_n	$\varepsilon(\text{novel}) / H_p(10)$	$\varepsilon(\text{previous}) / H_p(10)$
565 keV	0.056	0.0
780 keV	0.24	0.0
1.2 MeV	1.0	0.11
2.1 MeV (カリホルニウム-252)	3.6	2.2

565keV と 780keV における従来型速中性子センサーと 1cm 線量当量換算係数との比が 0.0 となっているのは、従来型速中性子センサーではこれらのエネルギーの中性子を検出できなかったためである。新型速中性子センサーでは、従来型速中性子センサーでは検出できていなかった 1MeV 以下の中性子を検出できるようになったため、これらの中性子に対して検出効率を得ることができ、エネルギー応答特性を 1cm 線量当量換算係数に近づけることができた。これは、1MeV 以下での線量測定の過小評価を改善できたことを示している。

3.2.4.2. 上限ディスクリの追加検討

新型速中性子センサーの検出効率は、中性子エネルギーに対して 7.5MeV まで増加傾向にある。これは、反跳陽子が空乏層に付与するエネルギーが、中性子エネルギーの増加とともに大きくなるためである。この増加傾向が、高エネルギーにおける 1cm 線量当量換算係数に対する過大評価の原因となっている。そこで、ガンマ線弁別のための下限ディスクリレベル E_{th} に加えて、エネルギーが高い中性子により反跳された陽子が付与する高いエネルギーの波高値をカットすることでエネルギー応答特性の増加を抑制する。このために高い波高値をカットする第 2 のディスクリレベル E_{upp} を設けた。これにより中性子エネルギー E に対する新型速中性子センサーの検出効率 $\varepsilon(E)$ を 1cm 線量当量換算係数に近づけていく。上限下限ディスクリを考慮したときの検出効率を式 3 - 4 に示す。

$$\varepsilon(E) = \int_{E_{th}}^{E_{upp}} R(E') dE' \quad (\text{式 3 - 4})$$

$R(E')$ は応答関数であり、 E' は空乏層に付与されたエネルギーである。

上限ディスクリは、新型速中性子センサーの検出効率が IEC61526 の要求を満たすように決定した。IEC61526 では、100keV～5MeV の中性子エネルギー範囲で 1cm 線量当量換算係数に対して -35%～+122% 以内であることを規定している。また、上限ディスクリを設定することで中性子感度が変わるため、下限ディスクリレベルを 450keV に変更した。上限ディスクリレベル 650keV を適用したときの検出効率を図 3 - 16 に示す。比較のために、1cm 線量当量換算係数と IEC61526 が規定している線量計の許容値、変更前(図 3 - 15)のエネルギー応答特性を示す。

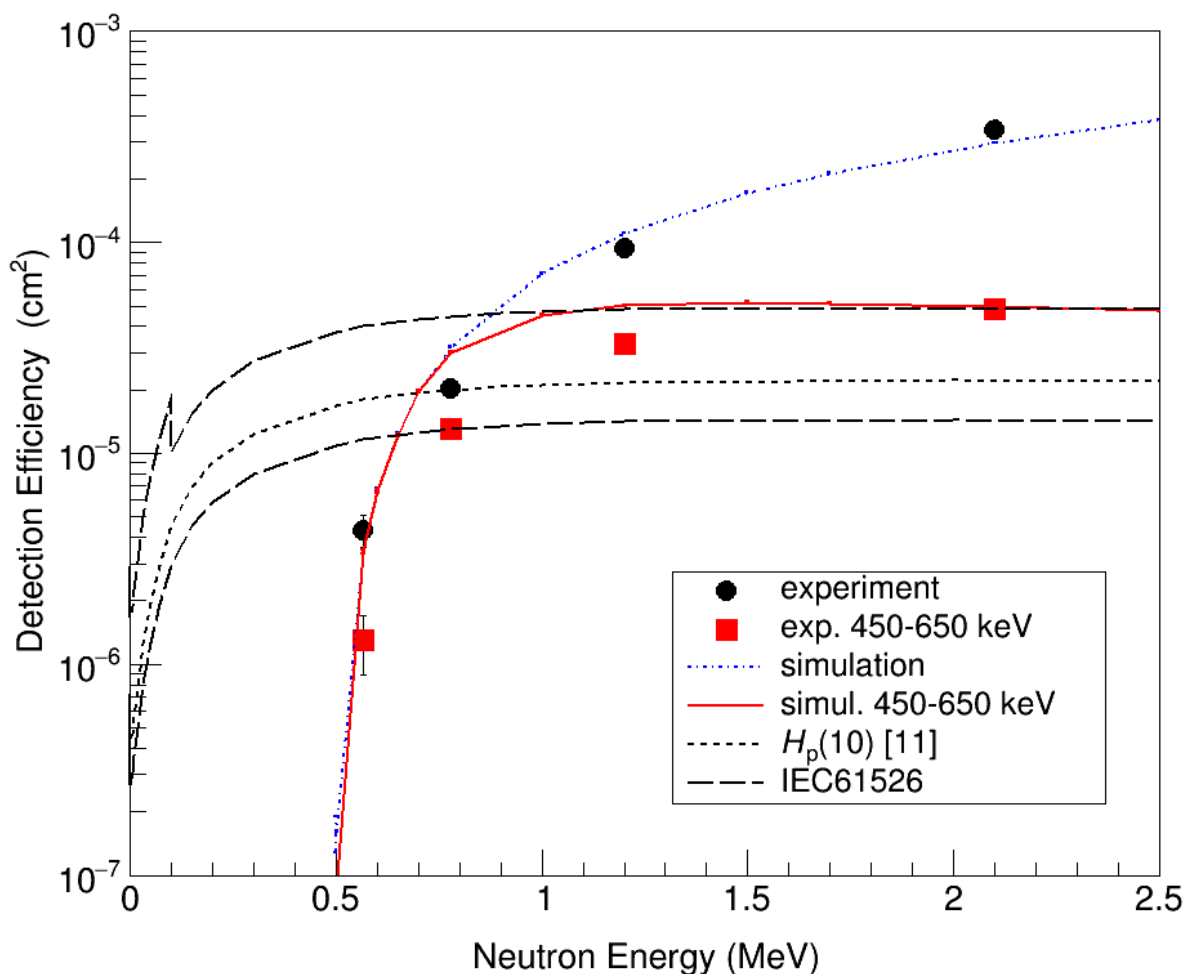


図3-16 上限ディスクリ設定有無における新型速中性子センサーの検出効率と1cm線量当量換算係数($H_p(10)$) [11]、IEC規格の許容値、変更前のエネルギー応答特性。

ディスクリレベルを $E_{th}=450\text{ keV}$ 、 $E_{upp}=650\text{ keV}$ とすることで、中性子エネルギー780 keV、1.2MeV、カリホルニウム-252($\bar{E}_n = 2.1\text{ MeV}$)に対して、実験結果で IEC61526 の要求を満たすことができた。下限ディスクリを変更したことで 565 keV に対する検出効率は下がった。また、シミュレーション結果より、2.5MeV 以上では空乏層を突き抜ける反跳陽子による付与エネルギーのピークが 450~650keV 付近にあるため、検出効率が大きくなり、IEC61526 の規定の許容値を上回った。上限のディスクリレベルを設定したことで、中性子エネルギー応答特性に寄与する計数が減少した。実験結果におけるカリホルニウム-252 の感度は、 $9.2\mu\text{Sv/count}$ であった。

このように上限下限ディスクリを適切に設定することで、ユーザが使用する放射線環境 [24]に適したエネルギー応答特性を調整できるようになると考える。

4. 新型熱中性子センサーの構造設計

4.1. 検出効率の中性子入射角度依存性

4.1.1. 角度依存性の評価方法

序論で述べた通り中性子は電荷をもっておらず直接測定することができない。そのため、ラジエータとの核反応によって生じた2次荷電粒子を検出することとなる。本研究では、新型熱中性子センサーのラジエータにリチウム-6を使用しているが、そのままでは図4-1に示す通り熱中性子センサーの応答特性と1cm線量当量換算係数に矢印で示す過大評価が生じてしまう。そこで、10keV以下のエネルギーにおいて、検出効率の中性子入射角度依存性をシミュレーションし、検出効率が1cm線量当量換算係数に近くなる角度から入射する中性子のみを検出するような新型熱中性子センサーの構造を考える [39]。

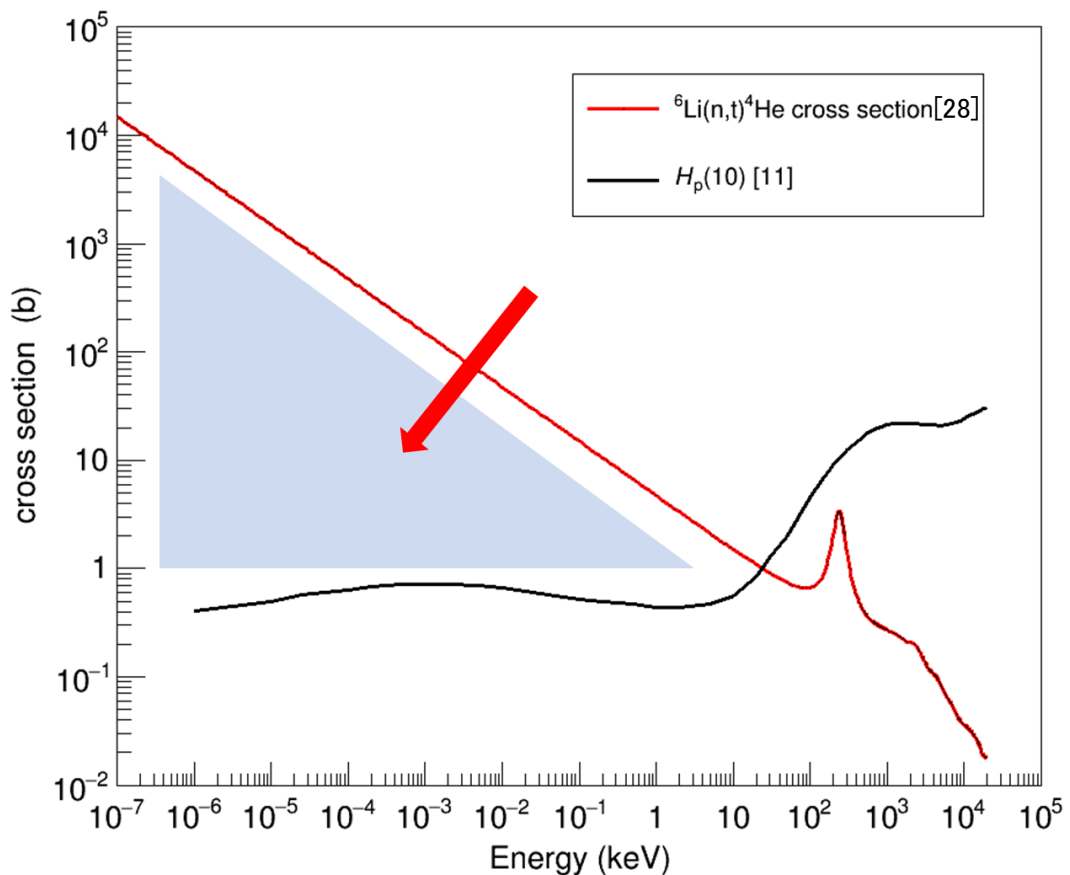


図4-1 1cm線量当量換算係数 [11]と中性子反応 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ の核反応断面積 [28]

検出効率の角度依存性評価には、モンテカルロシミュレーション法に基づいた PHITS3.020 [35]を使用した。核断面積ライブラリーとして PHITS 内で JENDL-4.0 [28]を使用している。中性子の輸送計算は、物質との相互作用により $1 \times 10^{-4} \text{eV}$ 以下のエネルギーとなったときに打ち切った。

シミュレーションの評価体系を図 4 - 2 に示す。新型熱中性子センサーの構造は図 2 - 6 に示す通りである。新型熱中性子センサーはファントムから 0.5cm 離し、ラジエータをファントム面に向けて配置した。0.5cm 離れた理由は、線量計として新型熱中性子センサーを筐体に格納したときに筐体表面から新型熱中性子センサーまでの距離を考慮したためである。本シミュレーションでは、大きさ 20×20cm、厚さ 10cm、密度 1.19g/cm^3 、組成 $\text{C}_5\text{H}_2\text{O}_8$ のアクリルファントムを使用した。ファントムは人体を模擬したものであり、人体で散乱した中性子成分を考慮することができる。中性子線源はファントム全体をカバーするように 20×20cm の平行ビームとし、0.01eV～10keV の単色中性子を照射した。新型熱中性子センサーに入射する中性子の入射角度はセンサーから見た中性子入射方向を 0° とし、 $0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $90^\circ \sim 105^\circ$ 、 $105^\circ \sim 120^\circ$ 、 $120^\circ \sim 135^\circ$ 、 $135^\circ \sim 150^\circ$ 、 $150^\circ \sim 165^\circ$ 、 $165^\circ \sim 180^\circ$ 方向からセンサーに入射した中性子のエネルギー分布を評価した。

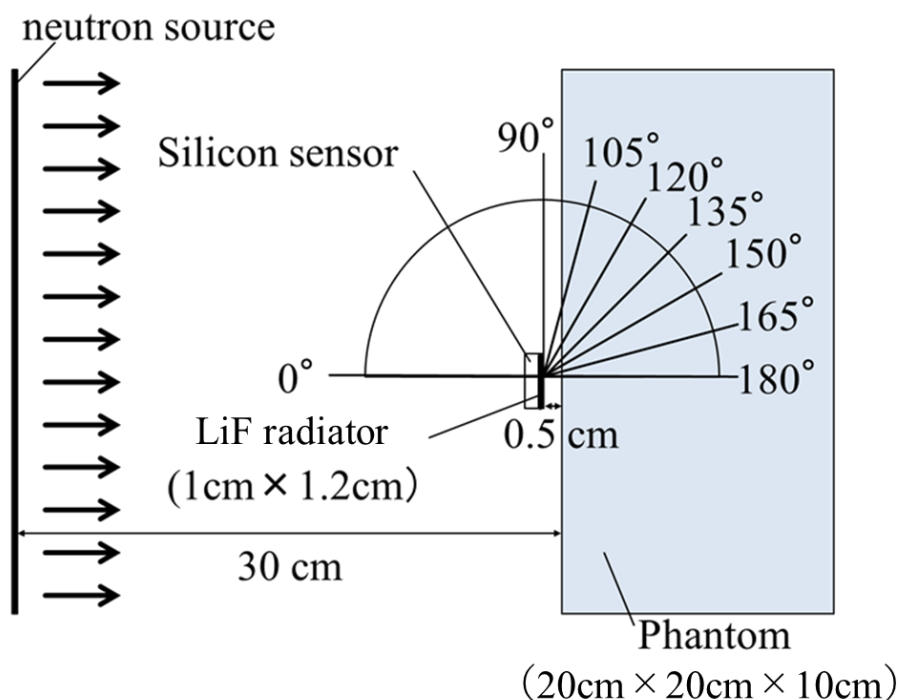


図 4 - 2 モンテカルロシミュレーションによる角度依存性評価の体系

検出効率の角度依存性をフッ化リチウムにおける ${}^6\text{Li}(\text{n,t}){}^4\text{He}$ の反応率によって評価した。新型熱中性子センサーのエネルギー応答特性を直接シミュレーションすると、中性子のファントム中での散乱、中性子核反応の効率、ラジエータからの生成2次粒子の輸送をしなければならないため、膨大なシミュレーション時間を要する。これを回避するために熱中性子ラジエータに入射する中性子エネルギー分布、生成された2次荷電粒子の輸送を別々にシミュレーションした。 ${}^6\text{Li}(\text{n,t}){}^4\text{He}$ の反応率 R_{reac} は、PHITS内に用意された T-cross タリーという計算コードを用いて各角度におけるフッ化リチウムを通過する中性子フルエンス $\phi(E')$ を計算し、その結果に ${}^6\text{Li}(\text{n,t}){}^4\text{He}$ の核反応断面積 $\sigma(E')$ を乗じることで求められる。 $R_{\text{reac}}(E_n)$ を式 4-1 に示す。

$$R_{\text{reac}}(E_n) = \int \sigma(E') \cdot \phi(E') dE' \quad (\text{式 4-1})$$

E_n は照射中性子エネルギー、 E' はフッ化リチウムに入射する中性子のエネルギーである。新型熱中性子センサーの検出効率 $\varepsilon(E_n)$ は、この反応率にリチウム-6 の原子数 N_{Li} と核反応によって生じたトリトンの検出効率 ε_t を乗じる。検出効率 $\varepsilon(E_n)$ を式 4-2 に示す。

$$\varepsilon(E_n) = R_{\text{reac}} \cdot \varepsilon_t \cdot N_{\text{Li}} \quad (\text{式 4-2})$$

ε_t や N_{Li} は、入射中性子エネルギーに依存しない定数であり、角度依存性の結果には影響しないため、検出効率は反応率に比例するので、ここでは検出効率の代わりに反応率の角度依存性を評価した。

4.1.2. 角度依存性の評価結果

検出効率の角度依存性の評価結果を図4-3に示す。縦軸は式4-1で導出した照射中性子当たりのフッ化リチウムラジエータの反応率であり、各々の立体角で規格化している。横軸は照射中性子エネルギーである。

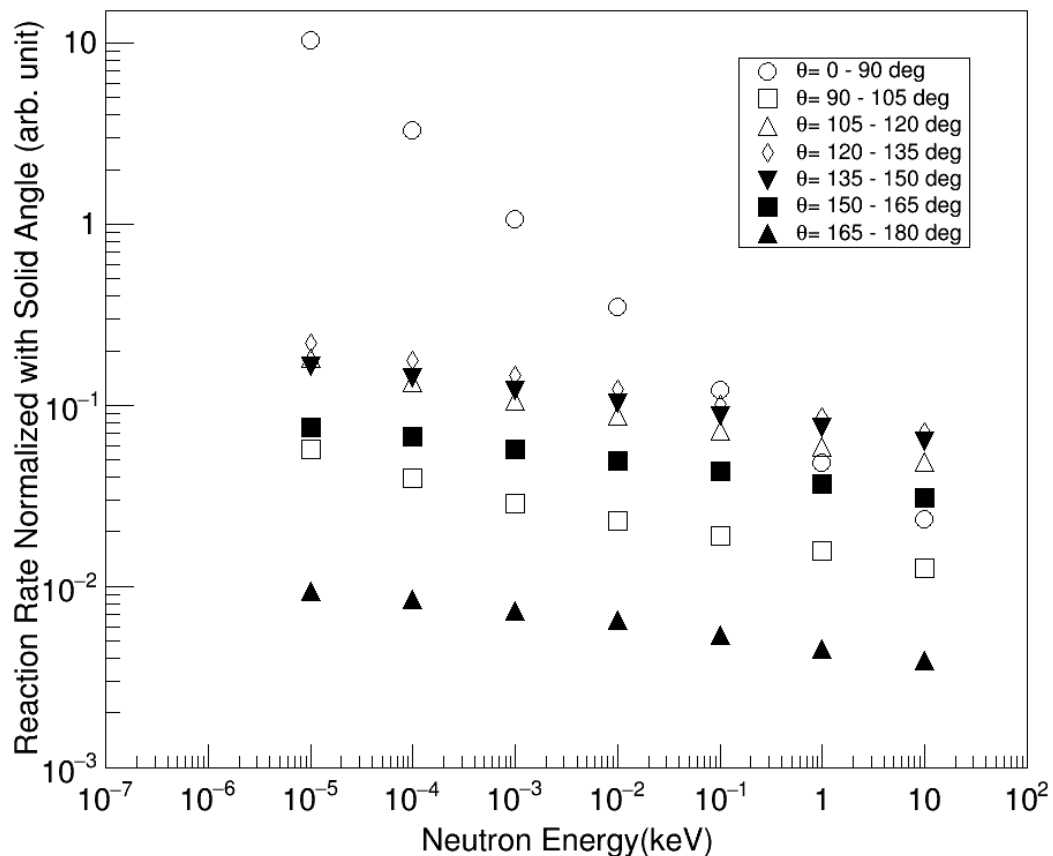


図4-3 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応率の中性子入射角度依存性

図4-3より、 $0^\circ\sim 90^\circ$ 方向の前方から入射した中性子に対する反応率と $90^\circ\sim 180^\circ$ の後方から入射した中性子に対する反応率で異なる傾向が表れている。 $0^\circ\sim 90^\circ$ 方向から入射した中性子に対する反応率は、照射中性子エネルギーが低いほど反応率が高く、 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ の核反応断面積のエネルギー特性と同じ傾向になっている。反応率は式4-1で表すことができ、 $0^\circ\sim 90^\circ$ 方向から入射する中性子では新型熱中性子センサー入射までに中性子の散乱が少なく、入射中性子エネルギーが照射中性子エネルギーに近いため、 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ の核反応断面積に近いエネルギー特性となっている。

一方、 $90^\circ\sim 180^\circ$ 方向から入射した中性子に対する反応率は、エネルギー依存性の小さいフラットなエネルギー特性を示している。図4-4に示すのは、新型熱中性子センサーへ入射する中性子エネルギー E の分布である。入射中性子のエネルギー分布は、ファントム内で散乱することで、どの照射中性子エネルギーに対しても熱中性子が大部分を占めていることがわかる。また、高エネルギーほどファントムを突き抜ける成分が増えるため、新型熱中性子センサーへ入射する中性子量が減っており、反応率のエネルギー依存性として表れている。入射中性子エネルギー $E_n = 10^5\text{keV}$ と $E_n = 10^4\text{keV}$ において、照射エネルギーよりも高いエネルギー分布を示しているのは、エネルギーの低い中性子が空気分子との散乱で平衡状態となり、エネルギーがマクスウェル・ボルツマン分布に従ったためである。

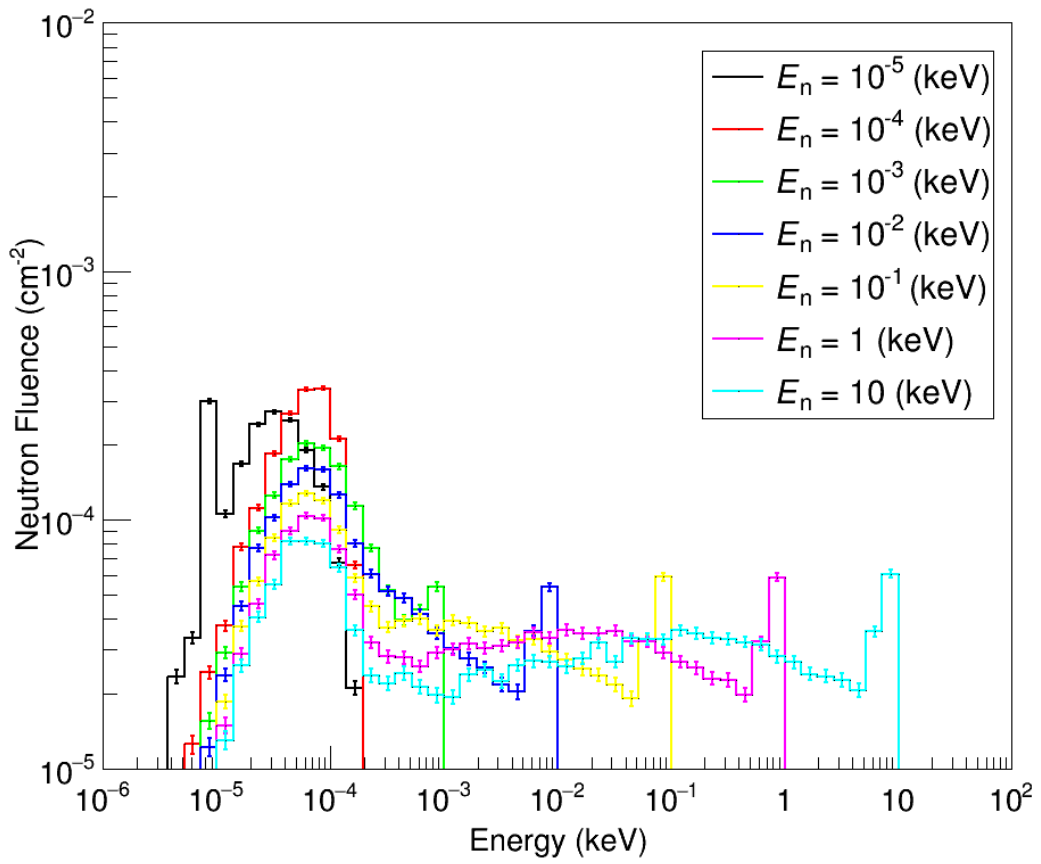


図 4 - 4 90°~180°方向から新型熱中性子センサーへ入射する中性子のエネルギー分布

表 4-1 は、それぞれの角度における反応率 R_{reac} と各応答特性の 0.1keV で規格化した 1cm 線量当量換算係数 $H_p(10)$ を比較した結果である。0°~90°方向に対する反応率は 1cm 線量当量換算係数と大きな相違があるが、90-180°方向では両者の相違が-48%~+199%内にある。中性子個人被ばく線量計の国際規格 IEC61526 [12]によれば、中性子エネルギー応答特性は、中性子エネルギー0.025eV~100keV の範囲で 1cm 線量当量換算係数に対して-35%~+300%内に収まるよう規定している。90°~180°方向では、それぞれの角度で適切な相対値をとることでこの要求を満たすことができる。

表 4-1 中性子反応率の角度依存性と 1cm 線量当量換算係数との比率

中性子入射角度	$R_{\text{reac}} / H_p(10)$
0°~90°	15%~8926%
90°~105°	63%~299%
105°~120°	38%~292%
120°~135°	52%~245%
135°~150°	65%~195%
150°~165°	67%~193%
165°~180°	55%~154%

表 4-2 に示すのは中性子入射角度を 90°~180°から 15°ごとに狭くしていったときの反応率 R_{reac} を 1cm 線量当量換算係数 $H_p(10)$ と比較した結果と当該角度内の反応率を合計した結果 $\Sigma R_{\text{reac}}(E)$ である。165°~180°方向から入射する中性子成分のみを検出したときの 1cm 線量当量換算係数との比は 55%~154%であり、最も 1cm 線量当量換算係数に近くなることが分かる。しかし、この時の反応率は低く、中性子に対する感度が低い。反応率の合計は 90°~180°と 105°~180°では大きく変わらないが、120°~180°から大きく低下している。また、90°~180°と 105°~180°の 1cm 線量当量換算係数との比較結果は、105°~180°の結果のほうが 1cm 線量当量換算係数に近い値となっている。このことからセンサーへの中性子入射角度は 105°~180°となるように新型速中性子センサーの構造を決定した。

表 4-2 中性子入射角度による中性子反応率と 1cm 線量当量換算係数との比率

中性子入射角度	$R_{\text{reac}} / H_p(10)$	$\Sigma R_{\text{reac}}(E)$
90°~180°	57%~222%	3.1
105°~180°	57%~219%	2.9
120°~180°	60%~206%	2.4
135°~180°	64%~188%	1.6
150°~180°	64%~182%	0.8
165°~180°	55%~154%	0.2

4.2. 新型熱中性子センサー構造の決定

検出効率の角度依存性の評価結果から、前方方向からの中性子を遮蔽する構造を考えた。遮蔽を加えた新型熱中性子センサーの構造を図 4 - 5 に示す。中性子の遮蔽には箱型のカドミウムを用いて中性子入射方向に対して新型熱中性子センサーにかぶせるように配置した。中性子入射面としているフッ化リチウムは面積 $1.0 \times 1.2 \text{cm}$ であるため、 105° 以下の中性子成分が入らないように図 4-5 に示すようにフッ化リチウム面から法線方向に対する開口角度が 105° となるようにカドミウムの大きさを決定した。カドミウムは、内寸 $2.8 \times 2.6 \text{cm}$ 、厚さ 1mm であり、密度は 8.65g/cm^3 である。

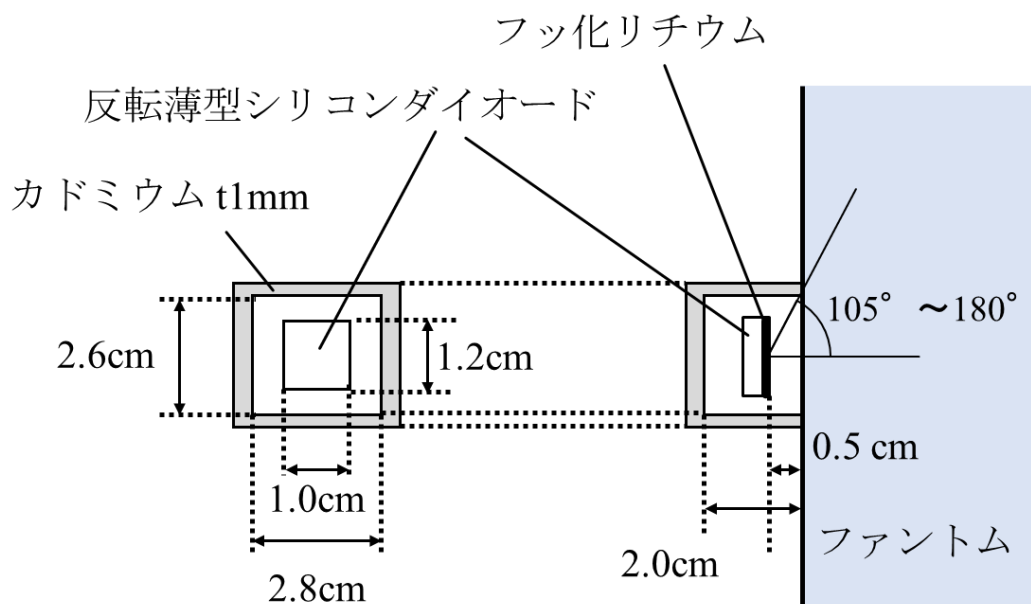


図 4 - 5 $0^\circ \sim 105^\circ$ から入射する中性子を遮蔽する新型熱中性子センサーの構造

4.3. 新型熱中性子センサー構造の評価

前項で求めたカドミウム遮蔽を加えた新型熱中性子センサー構造における検出効率をモンテカルロシミュレーションにより評価した。モンテカルロシミュレーションには、角度依存性の評価と同じく PHITS3.020 の T-cross タリーを使用し、検出効率は反応率で評価した。図 4-6 に示すのは、カドミウム遮蔽を追加した体系の反応率(w/t Cadmium)である。縦軸は反応率、横軸は照射中性子のエネルギーを示す。比較のためにカドミウム遮蔽無し(w/o Cadmium)の反応率とカドミウム遮蔽有りの 0.1keV で規格化した 1cm 線量当量換算係数($H_p(10)$)を示す。

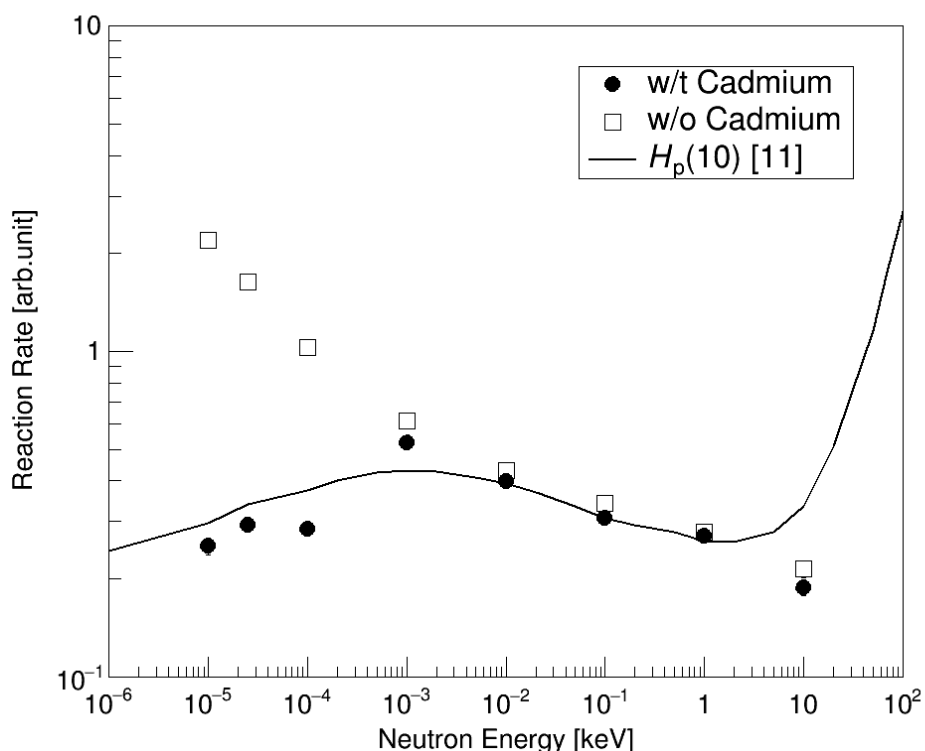


図 4-6 カドミウム遮蔽有り(w/t Cadmium)と無し(w/o Cadmium)における反応率と 1keV におけるカドミウム遮蔽有で規格化した 1cm 線量当量換算係数($H_p(10)$) [11]

カドミウム遮蔽により新型熱中性子センサーの応答特性は、熱中性子から 1keV の幅広いエネルギー範囲にわたり 1cm 線量当量換算係数に対し $\pm 25\%$ で一致した。 1×10^{-4} keV でカドミウム有りの応答特性が下がっているのは、図 4-7 に示す通り 2×10^{-4} keV 付近にカドミウムの中性子捕獲核反応断面積の共鳴ピークがあるためである。共鳴ピーク以上の中性子エネルギーに対してはカドミウムの核反応断面積は急激に下がる。そのため、1keV 付近からはカドミウム有りとカドミウム無しの応答特性は近い値となっている。10keV における応答特性は、1cm 線量当量換算係数に対して -43% となった。IEC61526 の要求は、1cm 線量当量換算係数に対して $-35\% \sim +300\%$ を満たすことであるが、規格を満足する規格化定数を用いることで IEC61526 の要求を満たすことができる。以上の結果から、 $0^\circ \sim 105^\circ$ 方向から新型熱中性子センサーへ入射する中性子を遮蔽する構造により、10keV 以下の検出効率で 1cm 線量当量換算係数に近いエネルギー特性を得ることができた。

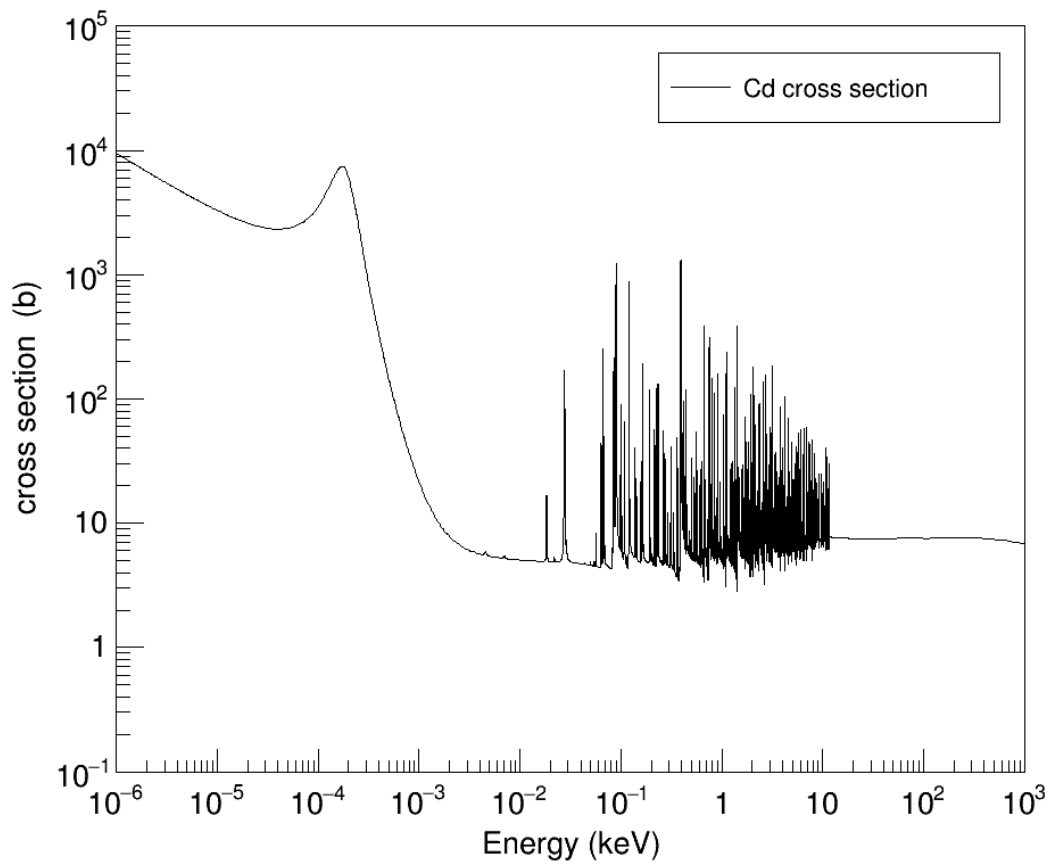


図 4 - 7 カドミウムの $^{nat}\text{Cd}(n,\text{total})$ 核反応断面積 [40]

5. 新型熱中性子センサーの応答特性評価

本項では、前方方向から入射する中性子を遮蔽する構造の新型熱中性子センサーを製作し、応答特性を評価する。前項では遮蔽材にカドミウムを使用した。カドミウムは毒性があるため実験では炭化ホウ素ゴムを使用した。炭化ホウ素ゴムを使用した新型熱中性子センサーの構造を図5-1示す。

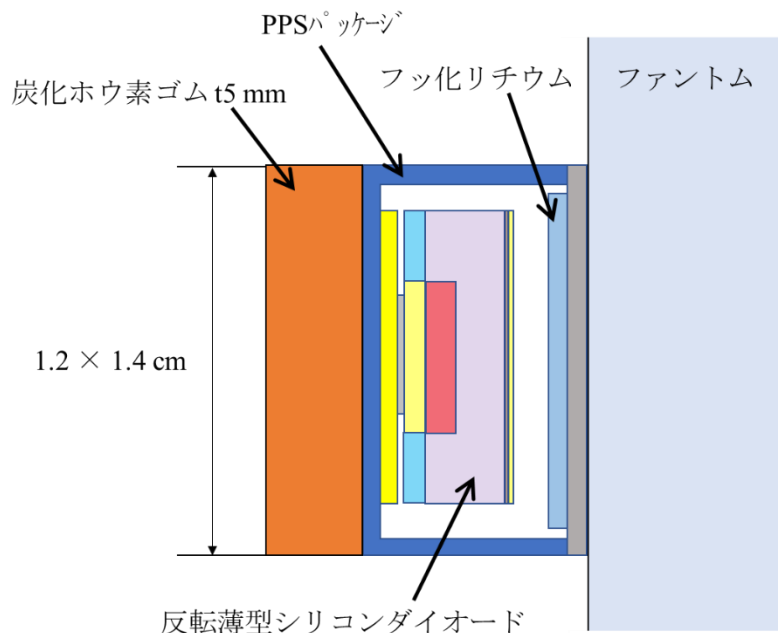


図5-1 実験で使用した新型熱中性子センサーの構造

炭化ホウ素ゴムは、80%の炭化ホウ素 B_4C と 20%のシリコーンゴム $(C_2H_6OSi)_n$ を混ぜたものであり、密度は $1.9g/cm^3$ である。寸法は新型熱中性子センサー表面が覆われるように $1.2 \times 1.4cm$ で、厚さは $5mm$ とした。直接入射する中性子を遮蔽するように炭化ホウ素ゴムを新型熱中性子センサーの中性子照射方向に貼付した。新型熱中性子センサーはファントムで散乱した中性子を検出するために、フッ化リチウムラジエータ面がファントム側となるようにファントムに装着した。

5.1. 評価方法

5.1.1. 中性子照射実験による評価

5.1.1.1. 黒鉛パイル場による熱中性子照射

黒鉛パイルを使用した熱中性子照射実験を産総研で実施した。黒鉛パイルは、 $230 \times 190 \times 190 \text{ cm}$ であり、中心に 148 GBq のアメリカシウム-241/ベリリウム線源を配置し、線源から発生した中性子が黒鉛パイルによって減速(熱化)され、マクスウェル分布を持つ中心エネルギーが 0.025 eV の熱中性子として取り出すことができる。アメリカシウム-241 は半減期 432.2 年で 5.4 MeV のアルファ線を放出する [41]。アメリカシウム-241 から発生するアルファ線とベリリウムが ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反応を起こしエネルギー $1 \text{ MeV} \sim 10 \text{ MeV}$ の連続分布を有する中性子を発生させる。実験で使用した熱中性子のスペクトルを図 5 - 2 に示す [32]。 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ 反応により発生した中性子は、黒鉛パイルにより減速され、熱中性子領域にピークがある。

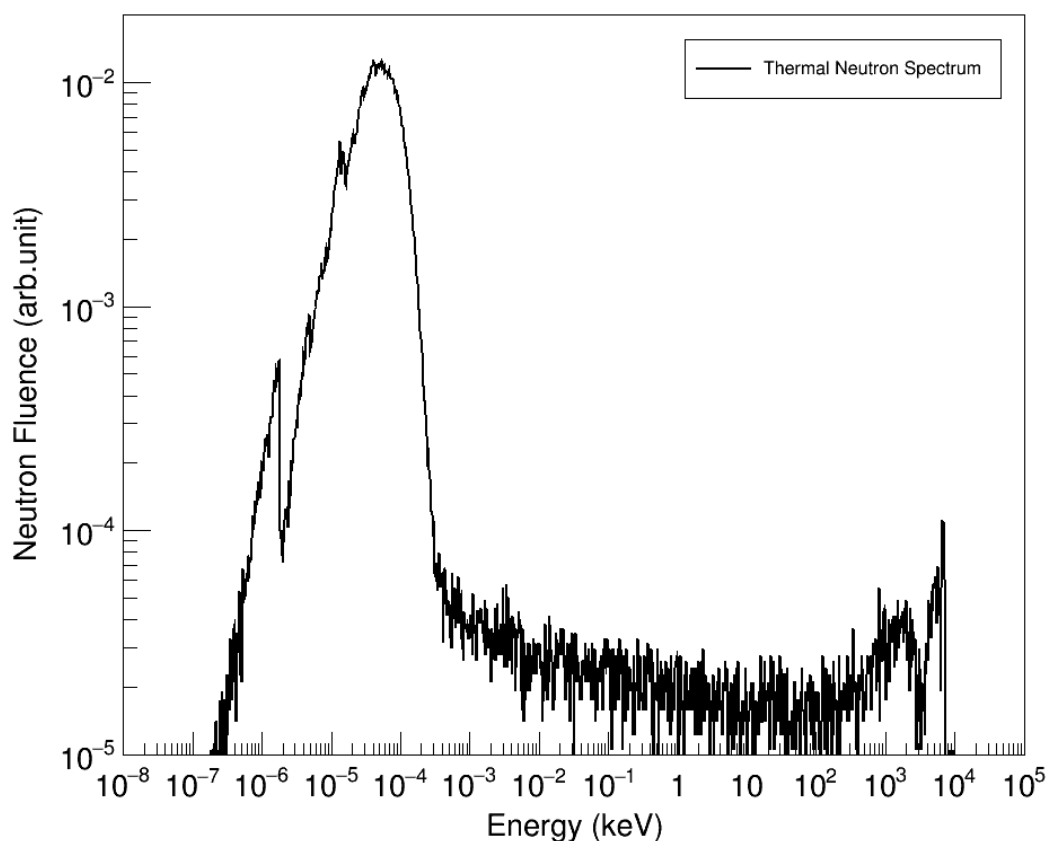


図 5 - 2 実験で使用した黒鉛パイルによる熱中性子のエネルギー分布 [32]

黒鉛パイルの照射体系を図 5 - 3 に示す。産総研では、黒鉛パイルから距離 40 cm のところで熱中性子の照射量が標準化されているため、新型熱中性子センサーを中性子と核反応するフッ化リチウムラジエータ面が黒鉛パイルから距離 40 cm となるように配置した。床面からの高さは 95 cm である。新型熱中性子センサーは、直接入射する中性子を遮蔽するために炭化ホウ素ゴムを黒鉛パイル方向となるようにファントムに装着した。

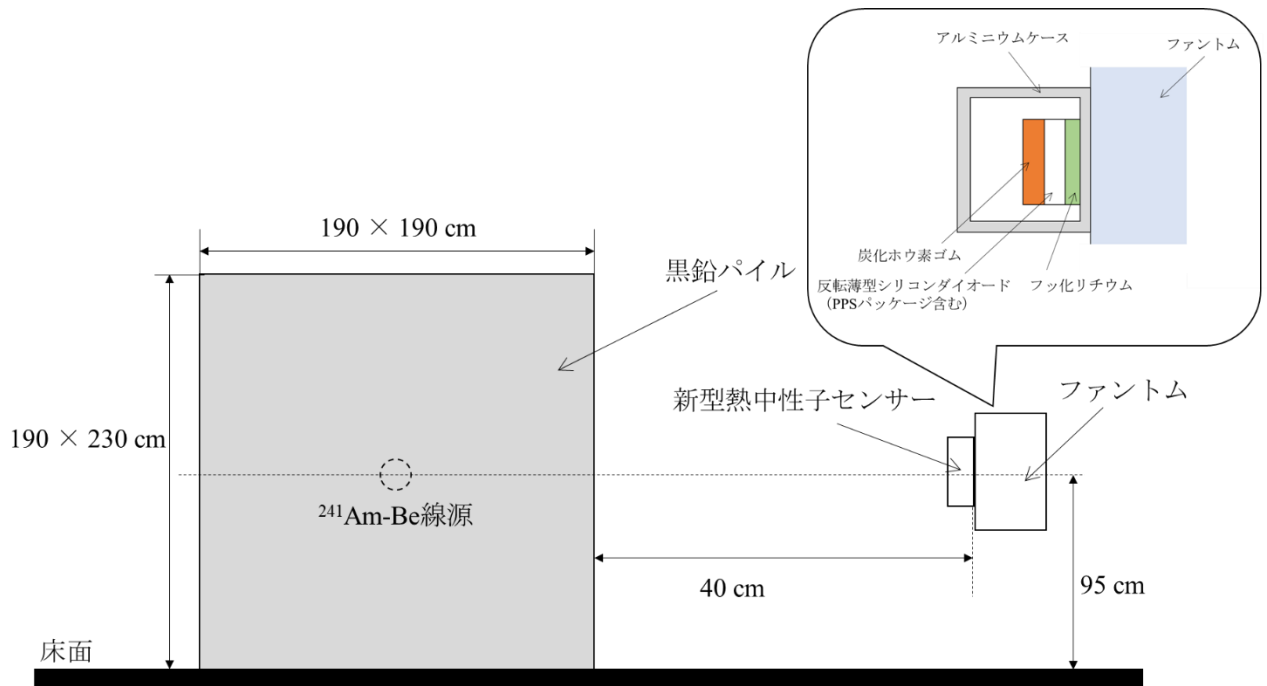


図 5-3 黒鉛パイルによる熱中性子照射の実験体系

黒鉛パイルの熱中性子基準フルエンス率は金箔放射化法により求められる [42]。金箔放射化法は、放射化した金箔の放射能をカドミウム遮蔽有無で測定し熱中性子のフルエンスを求める方法である。カドミウム遮蔽は熱中性子の遮蔽材に用いられる。カドミウム遮蔽無しでは熱中性子と熱外中性子のフルエンスを測定し、カドミウム遮蔽有りでは熱外中性子のフルエンスを測定している。これらを差し引くことで熱中性子のフルエンスを求めることができる。測定における熱中性子のフルエンス量とフラックスは $1.6 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ と $6.5 \times 10^1 (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ であった。

熱中性子照射により、熱中性子とフッ化リチウムラジエータの ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応で発生した 2 次荷電粒子の計数率が応答関数として得られる。 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応では 2 次荷電粒子としてトリトンとアルファ線が発生するが、新型熱中性子センサーはトリトンを検出対象とするため、式 5-1 に従い応答関数 $R(E')$ をアルファ線弁別のディスクリレベル $E_\alpha=2.05\text{MeV}$ 以上で積分することで検出効率 $\varepsilon(E_n)$ を求めることができる。

$$\varepsilon(E_n) = \int_{E_\alpha} R(E') dE' \quad (\text{式 5-1})$$

E_n は照射中性子エネルギー、 E' は空乏層内で吸収される荷電粒子のエネルギーである。

5.1.1.2. 加速器による単色中性子照射

加速器を使った測定では、144、250、565keVの単色中性子を熱中性子センサーに照射した。加速器にはバンデグラフ(Van de Graff)加速器 [13]を使用した。バンデグラフ加速器で加速した陽子ビームをリチウムターゲットに照射し、原子核反応 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ により中性子を発生させた。リチウムターゲットはタンタルと銅のバックングプレートに蒸着されている。加速器によって生じた単色中性子は、10~40 keV程度のエネルギー幅を持っている。

単色中性子の照射室は広さ11.5×11.5×11.5mであり、加速器のターゲットが照射室の中央に位置している。中央にターゲットを配置することで、照射室の床面と壁面における中性子散乱を最小限にできる。照射体系を図5-4に、実験時の様子を図5-5に示す。新型熱中性子センサーはフッ化リチウム面がファントム側となるようにファントムに装着し、ターゲットからフッ化リチウム面までの距離が30cmとなるように配置した。グレーティング構造の床からの高さは、1.5mである。

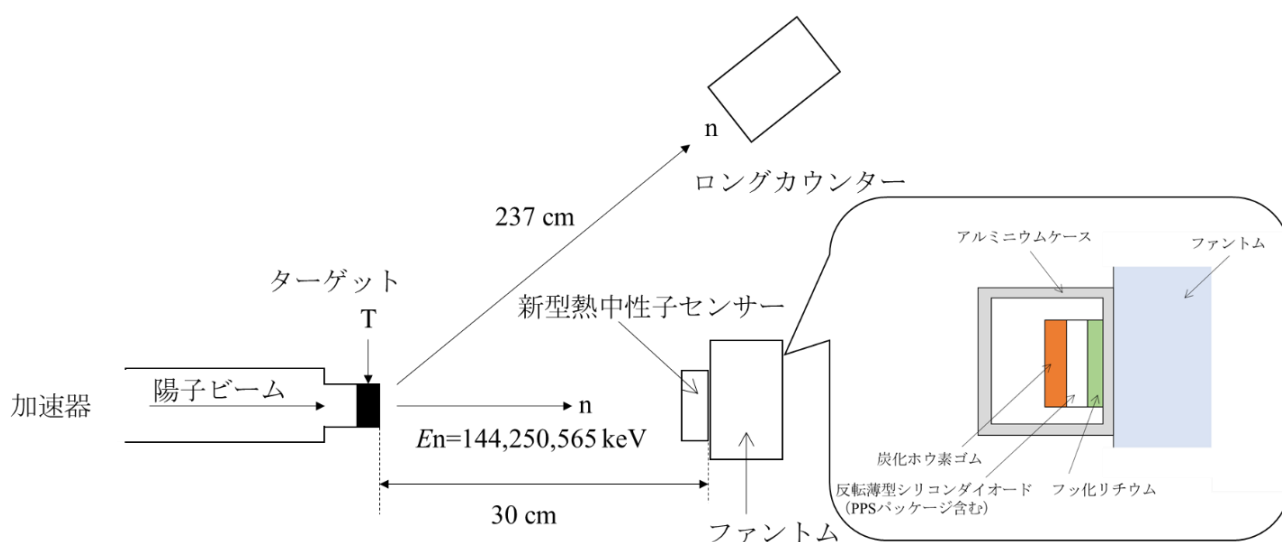


図5-4 新型熱中性子センサーへの単色中性子照射体系

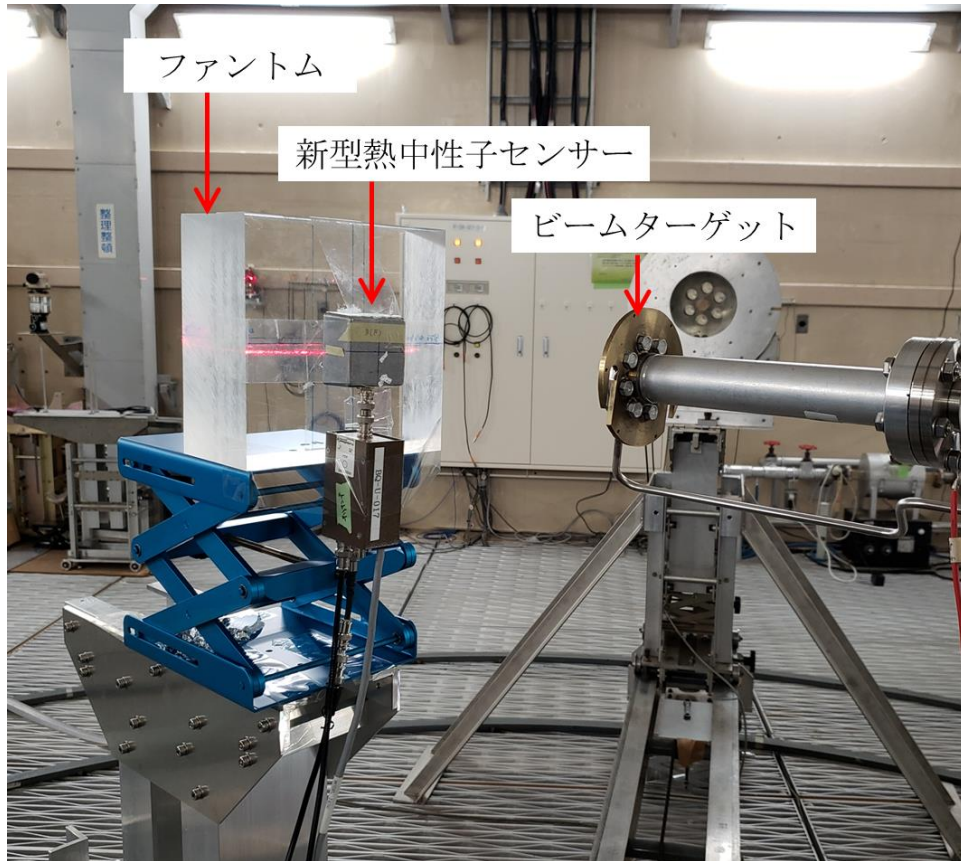


図 5 - 5 新型熱中性子センサーの加速器照射実験の様子

測定時の照射フルエンスは 144、250、565 keV の単色中性子に対してそれぞれ 5.4×10^6 、 7.2×10^5 、 $3.7 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 、フラックスは 1.6×10^3 、 6.7×10^2 、 $3.6 \times 10^3 (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ であった。これらのフルエンス量は、ターゲットから角度 45 度、距離 237cm に配置したロングカウンターの測定値を用いて導出される [33]。

単色中性子の照射により ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応で発生した 2 次荷電粒子の計数率が応答関数として得られる。新型熱中性子センサーは、トリトンを検出対象とするため、式 5 - 1 に従い応答関数 $R(E)$ をアルファ線弁別のディスクリレベル $E_a=2.05\text{MeV}$ 以上で積分することで検出効率 $\varepsilon(E)$ を求めることができる。

5.1.2. モンテカルロシミュレーションによる評価

中性子エネルギー応答特性をモンテカルロシミュレーションにより評価した。使用したシミュレーションコード及び核反応断面積ライブラリーは、PHITS3.020 [35]及びJENDL-4.0 [28]である。中性子の輸送計算の打ち切りエネルギーを $1 \times 10^{-4} \text{eV}$ とした。評価体系を図5-6に示す。炭化ホウ素ゴムはセンサー表面が覆われるよう $1.2 \times 1.4 \text{cm}$ で、厚さ 5mm とした。アルミニウムケースは $6 \times 6 \times 3 \text{cm}$ で、厚さ 2mm である。アルミニウムケースに入れた新型熱中性子センサーは、中性子線源からフッ化リチウム面までの距離を 30cm とし、炭化ホウ素ゴムを中性子が直接入射する面に向けて、 $20 \times 20 \times 15 \text{cm}$ のファントムに装着した。単色エネルギー $0.01 \text{eV} \sim 565 \text{keV}$ の中性子ビームをファントム全体がカバーされる広さ $20 \times 20 \text{cm}$ の平行ビームで新型熱中性子センサーに照射した。

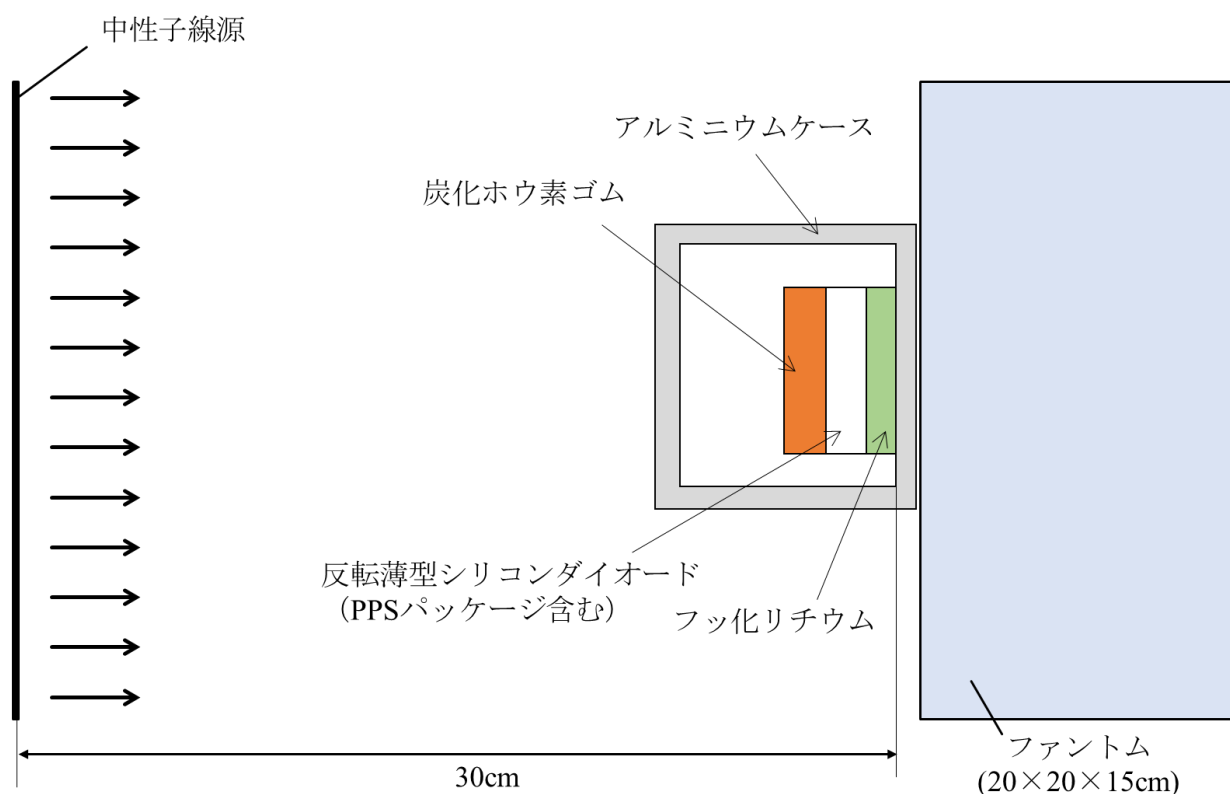


図5-6 中性子エネルギー応答関数の評価体系(ファントム面 $20 \times 20 \text{cm}$ 、アルミニウムケース面 $6 \times 6 \text{cm}$ 、新型熱中性子センサー面 $1.2 \times 1.4 \text{cm}$)

評価にはPHITS内の計算コードであるT-crossを使用した。T-crossでは、式4-1に示すフッ化リチウムを通過する中性子スペクトルを求めることができる。中性子スペクトルに ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応の核反応断面積を乗じることで照射中性子フルエンスに対する ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応率が求められる。 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応率は、式4-2によりリチウム-6の原子数 N_{Li} と発生したトリトンの新型熱中性子センサー入射効率 ϵ_i を乗じて、検出効率となる。原子数 N_{Li} は、実験で使用したフッ化リチウムの膜厚 $8.22 \mu\text{m}$ 、密度 2.64g/cm^3 、リチウム-6の濃縮率95%から 5.9×10^{19} 個と求めた。トリトンの検出効率 ϵ_i は、T-depositタリーを用いて、反転型薄型シリコンダイオードの空乏層領域にトリトンが付与したエネルギー量をシミュレーションした。評価体系を図5-7に示す。トリトン線源は、フッ化リチウムラジエータ($1 \times 1.2 \text{cm}$ 、 $t_{8.22 \mu\text{m}}$)全体に分布し、エネルギー 2.73MeV のトリトンが 4π 等方に放出される。シミュレーションによるトリト

ンの応答関数は図 5-8 のように得られる。この結果から、トリトンの検出効率 ϵ_t は、式 5-2 を用いて、アルファ線弁別ディスクリレベルである $E_a=2.05\text{MeV}$ 以上で積分することで 0.13 と求めた。

$$\epsilon_t = \int_{E_a} R_t(E') dE' \quad (\text{式 5-2})$$

$R_t(E')$ はトリトン検出時の応答関数、 E' はトリトンが空乏層内で付与したエネルギーである。

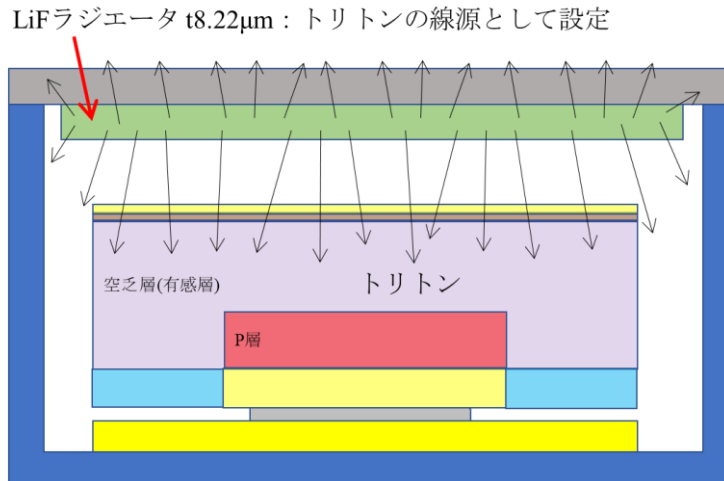


図 5-7 トリトン検出効率測定の評価体系

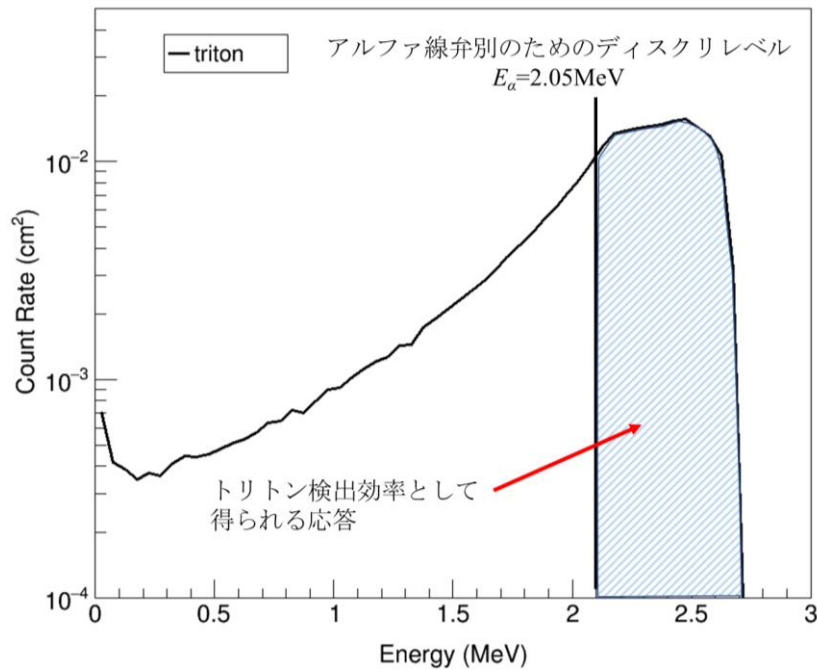


図 5-8 トリトン検出時の応答関数(PHITS による計算結果)

5.2. 結果と考察

5.2.1. 中性子照射実験による評価

新型熱中性子センサーに熱中性子及び単色中性子 144、250、565keV を照射し、応答関数を実験的に評価した。各中性子エネルギーにおける応答関数を図 5-9 に示す。縦軸は中性子フルエンス当たりの計数率、横軸は新型熱中性子センサーの空乏層に付与された 2 次荷電粒子のエネルギーである。

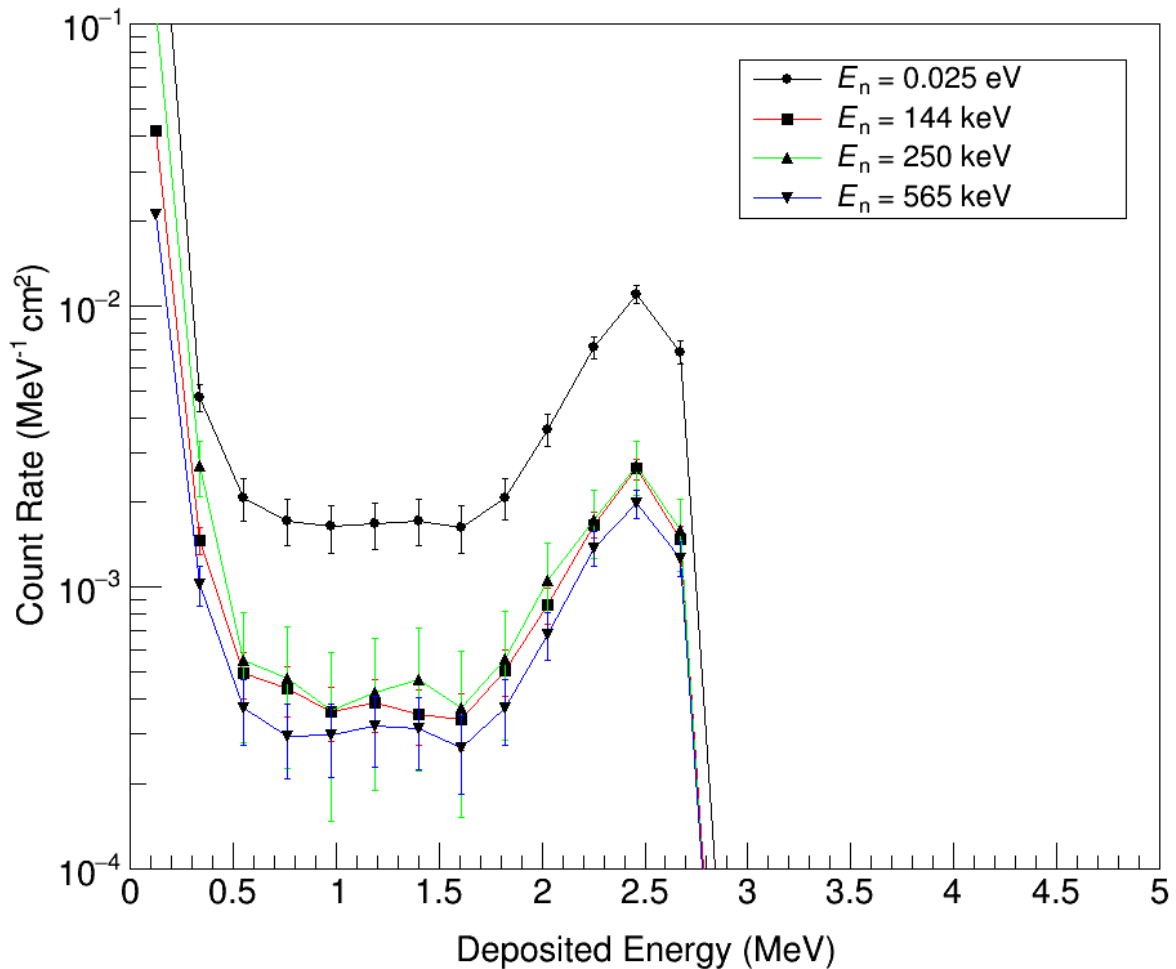


図 5-9 新型熱中性子センサーの応答関数

いずれの応答関数も $E_n=2.5\text{MeV}$ 付近にトリトン検出によるピークがある。照射中性子のエネルギーによって計数率が異なるのは、原子核反応 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ の核反応断面積の大きさが中性子エネルギーに依存するためである。 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応により、 2.05MeV のアルファ線と 2.73MeV のトリトンを発生する。 2.05MeV 付近にアルファ線のピークが見えないのは、ラジエータや新型熱中性子センサー不感層におけるエネルギー損失によりトリトンの応答関数に埋もれてしまったからである。 0.5MeV 以下で計数率が高くなっているのは、電子によるものである。中性子の検出効率率は、これらの応答関数を式 5-1 を用いて 2.05MeV 以上で積分することで求められる。

図 5 - 10 に示すのは、新型熱中性子センサーの検出効率の実験結果である。縦軸は中性子の検出効率、横軸は照射中性子のエネルギーである。炭化ホウ素ゴムの遮蔽効果を確認するために炭化ホウ素ゴムあり (exp. w/t B) と炭化ホウ素ゴムなし (exp. w/o B) の結果を示す。

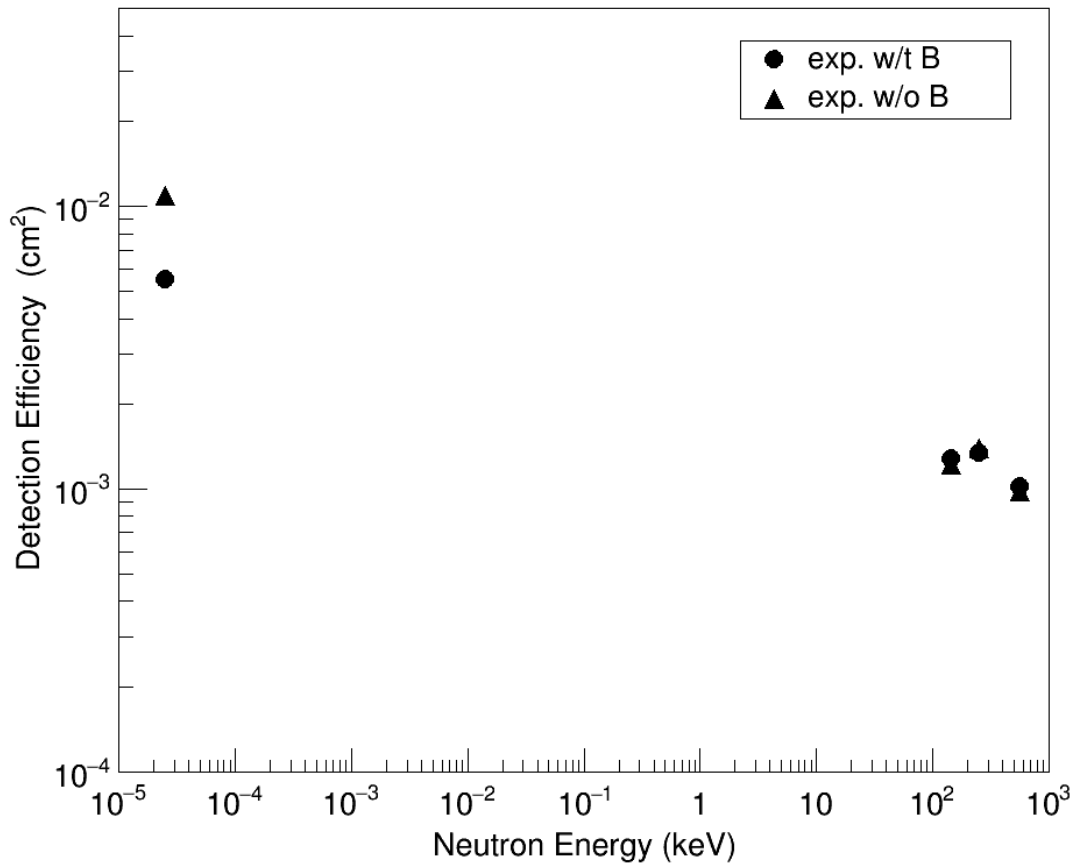


図 5 - 10 新型熱中性子センサーにおける炭化ホウ素ゴムあり (exp. w/t B) と炭化ホウ素ゴムなし (exp. w/o B) の中性子検出効率の実験結果

炭化ホウ素ゴムにより熱中性子エネルギー0.025eVにおいて、応答特性は $1.1 \times 10^{-2} \text{cm}^2$ から $5.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ に減少し、1cm線量当量換算係数に近い平坦な応答特性となった。炭化ホウ素ゴムにより熱中性子における計数効率は下がり、中性子感度は $2.1 \times 10^{-3} \mu\text{Sv/count}$ となった。この感度での $1 \mu\text{Sv}$ の熱中性子計測時の統計誤差は4.5%であり、統計誤差が十分に小さな測定が可能である。また、照射中性子エネルギー250keVにおける応答特性は、144keVにおける応答特性に対して1.1倍となり、リチウム-6の共鳴ピークによる効果を確認できた。但し、ピークによる効果は、図5-11に示すリチウム-6核反応断面積の共鳴ピークと比べると小さいものとなった。これは、250keVの中性子を照射したときのフッ化リチウムにおけるトリトン反応率が、ファントムにより熱化された中性子による核反応が大部分を占めるためである。中性子エネルギー250keV照射時の ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ の反応率を図5-12に示す。これにより、リチウム-6の共鳴ピークの効果小さくなった。しかしながら、検出効率の低下を防ぐことができ、1cm線量当量換算係数との過小評価を低減できた。照射中性子エネルギー144 keV以上では、ボロン遮蔽の核反応断面積が小さくなるため、炭化ホウ素ゴム有りの検出効率は炭化ホウ素ゴム無しの検出効率と近い値になっている。

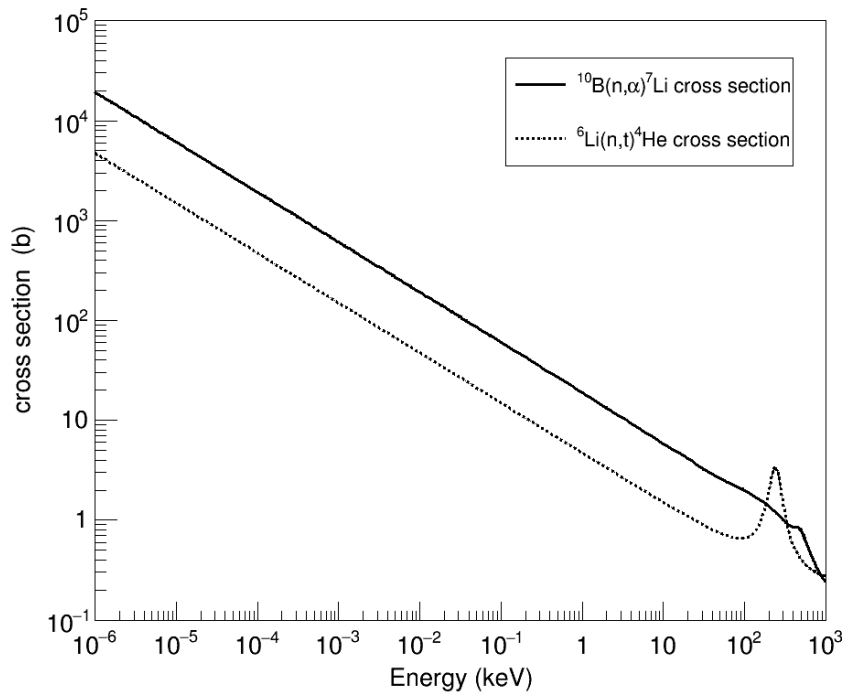


図 5 - 11 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ と ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ の核反応断面積 [28]

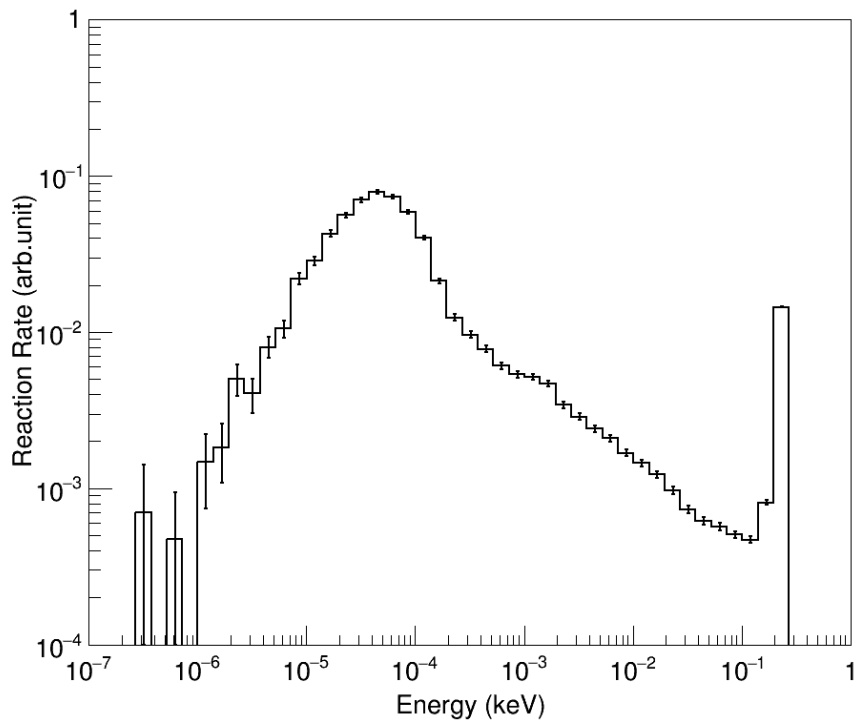


図 5 - 12 中性子エネルギー250keV 照射時にフッ化リチウムを通過する中性子スペクトルに ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 核反応断面積を掛け合わせた反応率(PHITS によるシミュレーション結果)

図 5 - 13 に示すのは、新型熱中性子センサーの検出効率を従来型熱中性子センサーの検出効率と比較した結果である。新型熱中性子センサーはラジエータとしてリチウム-6 を使用しているのに対して、従来型熱中性子センサーは天然ボロンを使用し、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応によって発生したアルファ線を測定している。 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応により放出するエネルギー Q 値、熱中性子における核反応断面積 σ 、生成されるアルファ線のエネルギー E 及びシリコン半導体中の飛程 R を表 5 - 1 に示す。

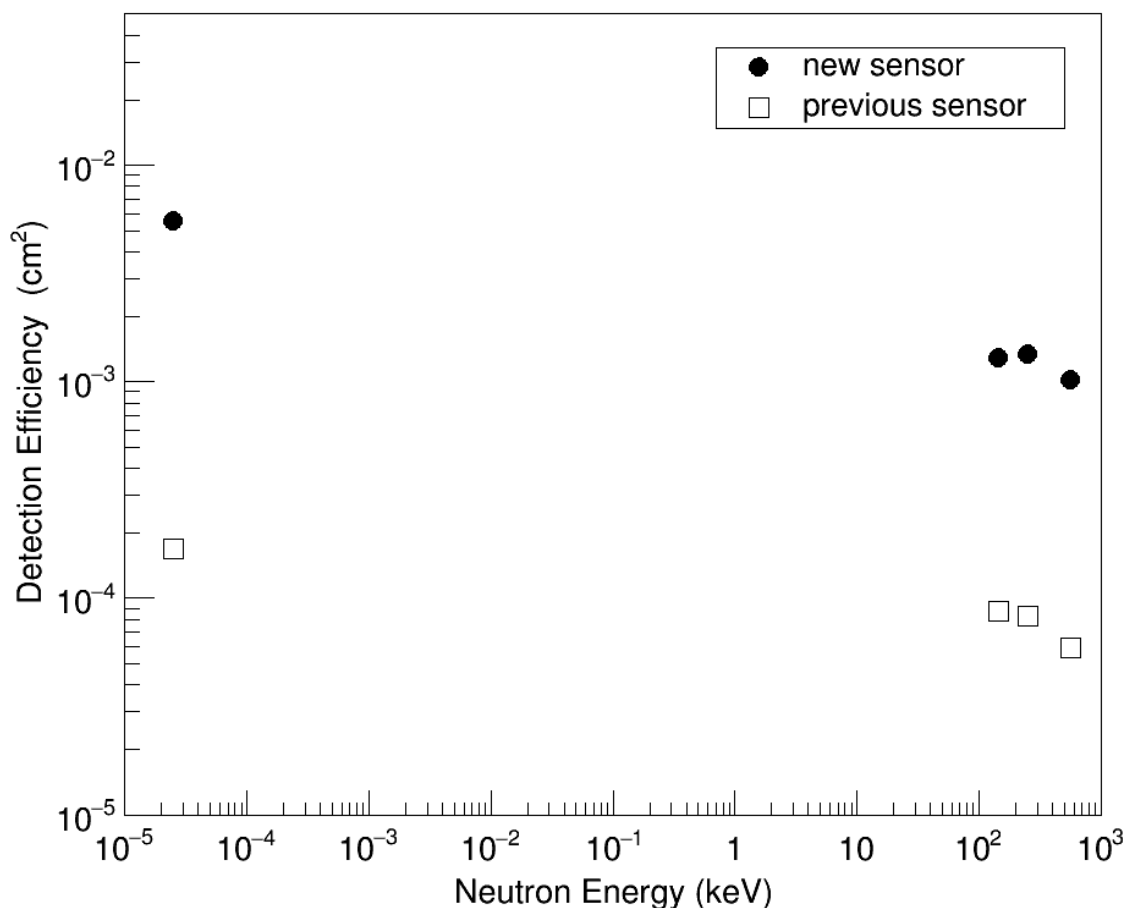


図 5 - 13 熱中性子センサーの検出効率の比較。黒丸が新型熱中性子センサー、白四角が従来型熱中性子センサーである。

表 5 - 1 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応の Q 値、熱中性子における核反応断面積 σ 及び生成されるアルファ線のエネルギー E' とシリコン半導体中の飛程 R

Q 値(MeV)	σ (b)	E' (MeV)	R (μm)
2.31	3838	1.47	5.17

新型熱中性子センサーの検出効率は熱中性子領域において従来型熱中性子センサーと比べて 32 倍高くなった。リチウム-6 の核反応断面積は図 5 - 11 に示す通りボロン-10 よりも低い、リチウム-6 ラジエータから得られる 2 次荷電粒子のトリトン、ボロン-10 ラジエータから得られる 1.47MeV のアルファ線よりもエネルギーが高く、飛程が長い、より多くの生成 2 次荷電粒子を検出できる。これに加

えて新型熱中性子センサーは不感層が極めて薄いため、2次粒子のエネルギー損失を低減でき、より多くの粒子をセンサー空乏層に入射させられ検出できたため、検出効率が高くなった。検出効率は、表面不感層の薄型化の効果により6.4倍に、中性子ラジエータ変更の効果により5.1倍に増加し、合計で32倍に増加した。

144 keV に対する 250 keV の検出効率の比率は、従来型熱中性子センサーでは0.94であるのに対し、新型熱中性子センサーは1.1であり、100keV以上の応答特性低下を改善することができた。

5.2.2. モンテカルロシミュレーションによる評価

図5-14に示すのは、炭化ホウ素ゴム有りにおける実験結果とシミュレーション結果である。縦軸は検出効率、横軸は中性子照射エネルギーである。比較のために1cm線量当量換算係数($H_p(10)$)とIEC61526により規定された1cm線量当量換算係数に対する許容値(-35%~+300%)を破線で示した。

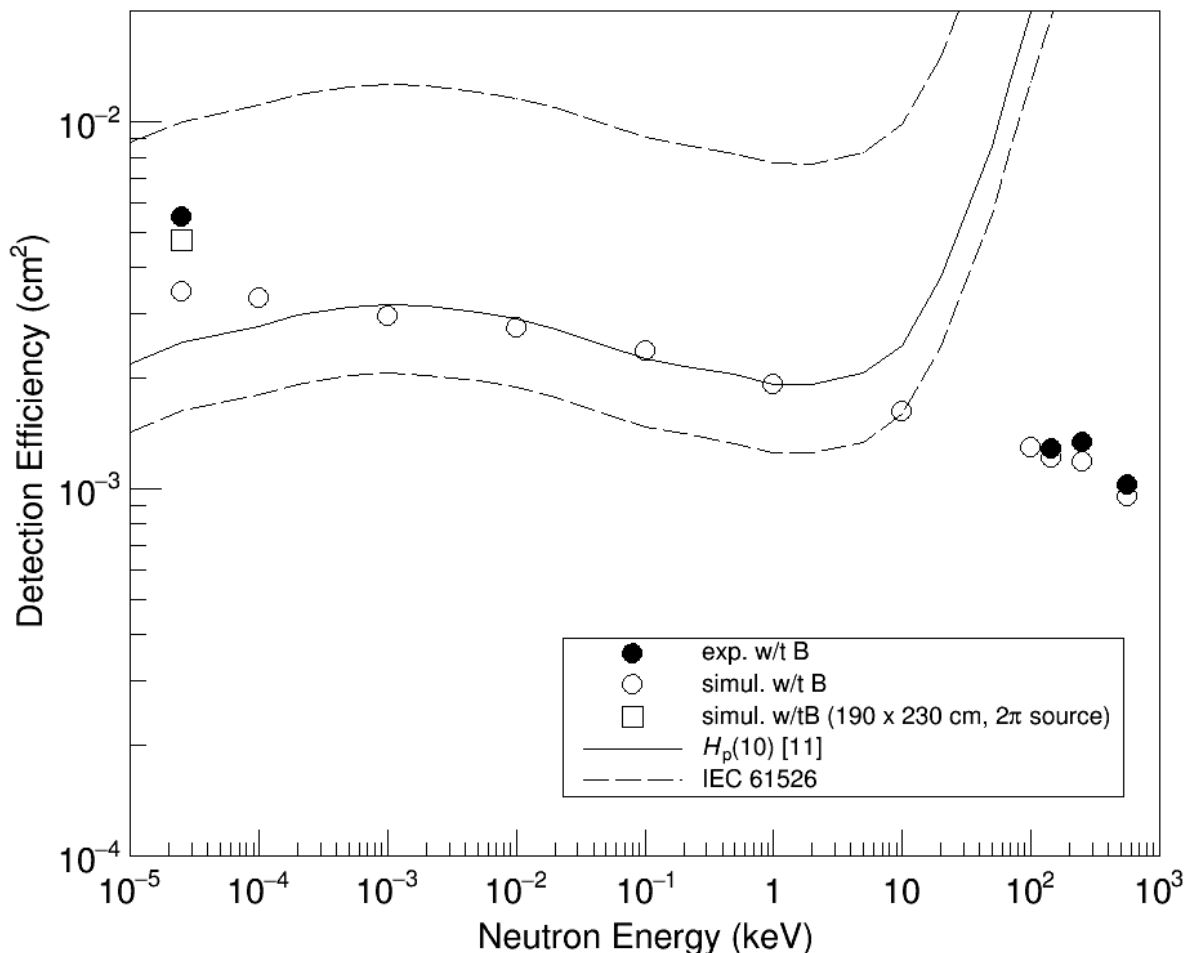


図5-14 実験とシミュレーションによる検出効率と1keVにおける実験結果で規格化した1cm線量当量換算係数($H_p(10)$) [11]、IEC規格で規定された許容範囲

シミュレーション結果は、熱中性子を除き実験結果に対して6~12%の過小評価で一致した。熱中性子では実験結果を38%過小評価した。これは、黒鉛パイル表面から発生した熱中性子が加速器で生じた単色中性子と異なり、大きな線源面積を持ち、黒鉛パイル表面全体から2π方向に熱中性子が発生するこ

とが原因と考えられる。そこで、黒鉛パイル表面全体から 2π 方向に中性子が発生するように線源面積を変更したところ、熱中性子のシミュレーション結果は実験値を 14%過小評価に改善された。このことから、黒鉛パイルによる熱中性子のシミュレーション評価では、並行ビームで熱中性子がセンサーとファントムに入射するのではなく、黒鉛パイルの表面全体から 2π 方向に放出される線源を採用すべきであることが分かった。ここでは、熱中性子の黒鉛パイル表面での空間分布と放出方向に関する知見が無いいため、黒鉛パイル全表面で均一とし、均等方向に放出されているとしている。結果、シミュレーション結果は実験結果をよく再現しており、熱中性子(0.025eV)から 100keV までの幅広い中性子エネルギー領域において新型熱中性子センサーのエネルギー応答特性を評価できたといえる。

1cm 線量当量換算係数を 1keV のシミュレーション結果で規格化し、実験結果及びシミュレーション結果と比較した。比較結果を表 5-2 に示す。実験結果とシミュレーション結果は、1cm 線量当量換算係数に対して 0.025eV~10keV で 66%~190%となった。線量計の国際規格である IEC61526 は、0.025eV~100keV のエネルギー範囲で中性子個人被ばく線量計のエネルギー応答特性が 1cm 線量当量換算係数に対して 65%~400%内にあることを規定しており、新型熱中性子センサーは 0.025eV~10keV でこの規定を満たしている。

表 5 - 2 1cm 線量当量換算係数($H_p(10)$)に対するシミュレーションで得られた検出効率(ϵ_{simul})の比率

中性子エネルギー E_n	$\epsilon_{\text{simul}} / H_p(10)$
0.025eV	190%
0.1eV	120%
1eV	93%
10eV	95%
100eV	105%
1keV	100%
10keV	66%

6. リアルタイム個人被ばく線量計への展開

6.1. 中性子エネルギー応答特性

ここまで反転薄型シリコンダイオードを使用した新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーを製作し、それぞれ個別に中性子エネルギー応答特性を評価してきた。実際の線量計は、中性子に対する感度が異なる新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーの2種類を組込んでいる。新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーの検出効率に感度調整係数を乗じ、個人線量計としての中性子エネルギー応答特性を導出した。感度調整係数を考慮した新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーを組み合わせた中性子エネルギー応答特性は式6-1で表すことができる。

$$R_{\text{res}}(E) = C[f_f \varepsilon_f(E) + f_{\text{th}} \varepsilon_{\text{th}}(E)] \quad (\text{式6-1})$$

ε_f 、 ε_{th} は、それぞれ新型速中性子センサー、新型熱中性子センサーの検出効率を示す。 f_f は新型速中性子センサー、 f_{th} は新型熱中性子センサーの感度調整係数である。個人線量計の感度 $R_{\text{res}}(E)$ はそれぞれの中性子センサーの検出効率を足し合わせたものに校正定数 $C(\text{mSv/count})$ を乗じて求めることができる。富士電機(株)製の個人線量計は、式6-1を用いて個人線量計としての中性子エネルギー応答特性を1cm線量当量換算係数に合致させるために感度調整係数 f_f と f_{th} を調整し、カリホルニウム-252線源照射により各線量計を校正した結果から計数当たりの1cm線量当量を校正定数 C としている。

感度調整係数 f_f 、 f_{th} は、中性子エネルギー0.01eV~15MeVの範囲でIEC61526[12]の規定を満たすように $f_f=1.0 \times 10^0$ 、 $f_{\text{th}}=4.9 \times 10^{-4}$ とした。本研究で導出された個人線量計としてのエネルギー応答特性を図6-1に示す。暫定的に校正定数は $C=1$ としている。新型速中性子センサーの結果はIEC61526の規定を満たすために上限ディスクリを追加し、新型熱中性子センサーのシミュレーション結果は遮蔽材としてカドミウムを使用した結果である。比較のために従来型センサーの中性子エネルギー応答特性と1cm線量当量換算係数もそれぞれ示す。従来型熱中性子センサー(Previous Thermal Sensor)と従来型速中性子センサー(Previous Fast Sensor)は、それぞれ新型熱中性子センサー(Novel Thermal Sensor)と新型速中性子センサー(Novel Fast Sensor)の144keVと1.2MeVの実験結果で規格化している。1cm線量当量換算係数($H_p(10)$)は、新型速中性子センサーの780keVの値がIEC61526の定める1cm線量当量換算係数に対する下限値となるように規格化している。

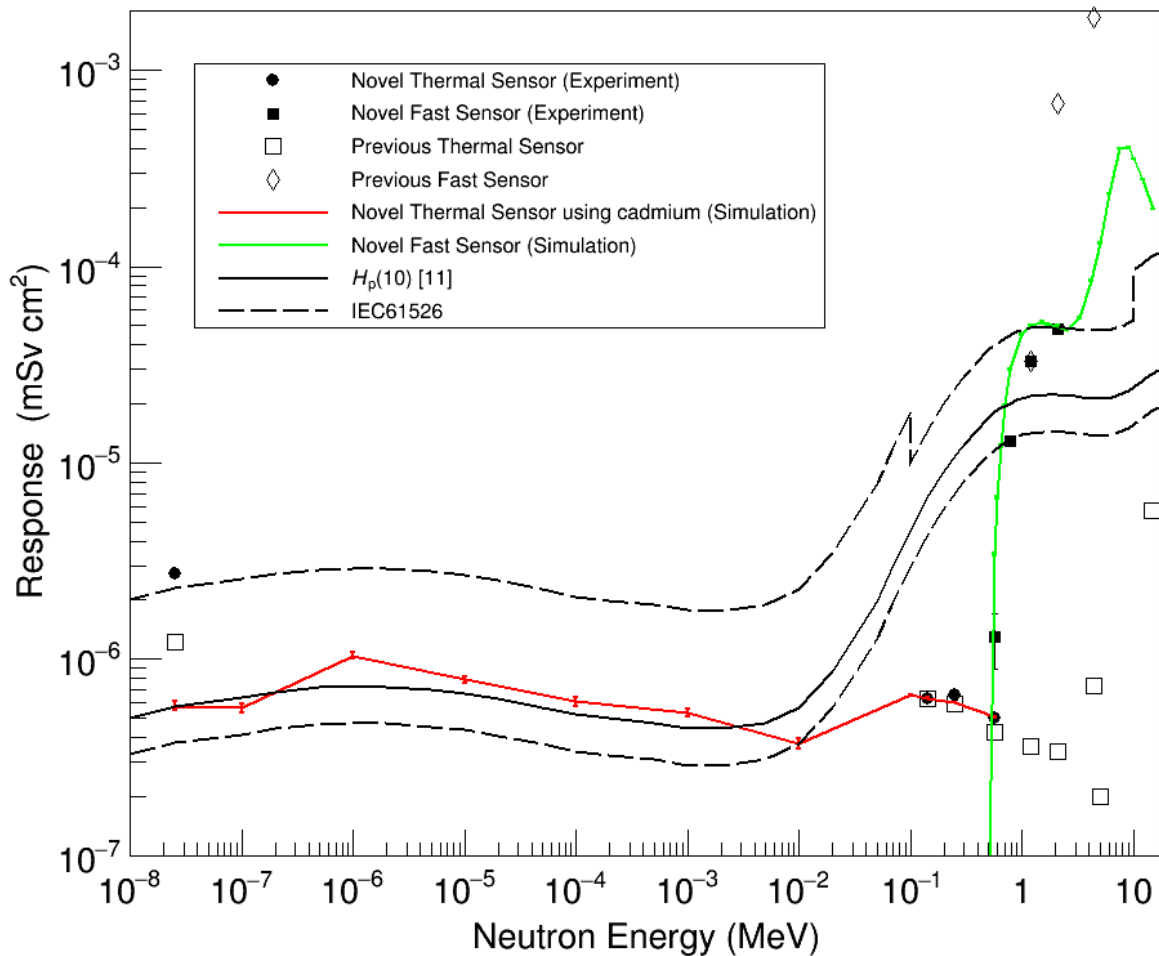


図 6-1 熱中性子と速中性子センサーを組合せた個人線量計の中性子エネルギー応答特性。熱中性子センサーは遮蔽材にカドミウムを用いたものである。

評価結果より、新型個人線量計の中性子エネルギー応答特性は中性子エネルギー100keV から 1MeV において従来型個人線量計よりも大きく、1cm 線量当量換算係数に対する過小評価を大幅に改善することができた。100keV 以上では、ラジエータとして使ったリチウム-6 の共鳴ピークにより 250keV と 565keV の応答特性を改善できている。1MeV 以下では、従来の中性子個人被ばく線量計は熱中性子センサーによる応答しか得られていなかったが、反転薄型シリコンダイオードを使用した新型速中性子センサーによりガンマ線感度と反跳陽子のエネルギー損失を低下させ、このエネルギー領域の応答特性を大幅に増加することができた。1.2MeV よりも高い中性子エネルギーで、従来の中性子センサーの応答特性が新型速中性子センサーよりも大きくなっているのは、ファネリング [26]による効果と考えられる。新型速中性子センサーでは、従来型速中性子センサーに比べて、シリコンダイオードを薄くしているため、ファネリングの効果を抑えられている。上限下限ディスクリレベルを設定し高いエネルギー成分を抑制しても、中性子エネルギー2.5MeV 以上では、中性子エネルギー応答特性が増加している。エネルギーが低い中性子により反跳された陽子はシリコン中で完全に止まるために大きなエネルギーが得られるのに対し、中性子エネルギーが 1.8MeV よりも高くなると中性子により反跳された陽子はシリコンを透過するようになる。反跳された陽子はその一部のエネルギーしかシリコン中に付与しなくなるため、

シリコンを透過する陽子により付与されるエネルギーは中性子エネルギー上昇とともに徐々に低下する。この低下したエネルギー付与が 450~650keV の領域となったときに中性子エネルギー応答特性が増加することとなる。中性子エネルギー7.5MeV 以上では付与エネルギーのピークが下限ディスクレベル 450keV 以下となるため、応答特性は低下している。ファネリング効果の減少と上限ディスク追加により新型速中性子センサーの応答特性は従来型速中性子センサーの応答特性よりも 1cm 線量当量換算係数に近づいた。中性子エネルギー10keV 以下では、カドミウム遮蔽により中性子に対する感度が抑えられ、従来型熱中性子センサーよりも 1cm 線量当量換算係数に近づいている。

図 6 - 2 に示すのは、新型熱中性子センサーの遮蔽材に炭化ホウ素ゴムを使用したシミュレーション結果である。その他の結果は図 6 - 1 と同じである。中性子エネルギー100keV 以下では従来型熱中性子センサーのほうが 1cm 線量当量換算係数に近い中性子エネルギー応答特性を示しているが、新型熱中性子センサーの 1cm 線量当量換算係数比は 311%であるため IEC61526 の規定を満足している。

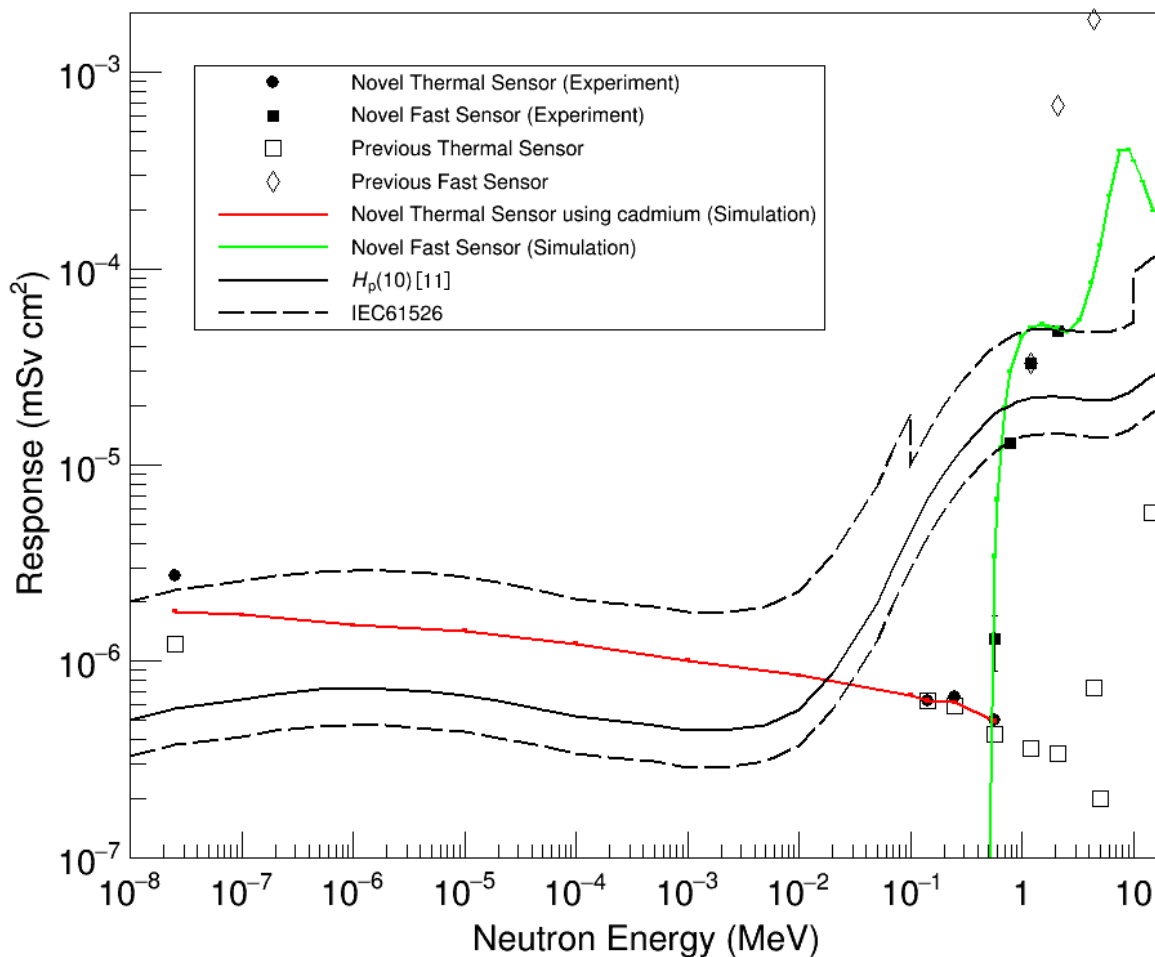


図 6 - 2 新型熱中性子と新型速中性子センサーを組合せた個人線量計の中性子エネルギー応答特性。熱中性子センサーは遮蔽材に炭化ホウ素ゴムを用いたものである。

表 6 - 1 に示すのは、新型センサーと従来型センサーで作製した中性子個人被ばく線量計のエネルギー応答特性（図 6 - 1、図 6 - 2）における 1cm 線量当量換算係数との比較結果である。

表 6 - 1 新型センサーと従来型センサーのエネルギー応答特性と 1cm 線量当量換算係数との比率

中性子エネルギー E_n	新センサー/ $H_p(10)$		従来センサー $/H_p(10)$	IEC61526規定	
	カドミウム遮蔽	炭化ホウ素ゴム遮蔽			
0.025eV	100%	311%	212%	65%~400%	
0.1eV	88%	271%	-		
1eV	142%	210%	-		
10eV	118%	215%	-		
100eV	116%	237%	-		
1keV	120%	227%	-		
10keV	66%	149%	-		
100keV	14%	15%	-		
144keV	9%	9%	9%		65%~222%
250keV	6%	6%	5%		
565keV	22%	22%	3%		
780keV	149%	同左	-		
1.2MeV	229%	同左	152%		
カリホルニウム-252 (2.1MeV)	224%	同左	3030%		
4.4MeV	525%	同左	8790%		
5MeV	622%	同左	10497%		
14.8MeV	713%	同左	10833%	65%~400%	

線量計のエネルギー応答特性として新型センサーを評価した時、反転薄型シリコンダイオードはとりわけ新型速中性子センサーの応答特性改善への効果大きい。新型熱中性子センサーの応答特性改善は遮蔽材を導入した効果大きい。反転薄型シリコンダイオードの使用により従来型熱中性子センサーよりも中性子感度が向上したため中性子計数率が増加し、統計精度も上昇した。

6.2. 1cm 線量当量評価

中性子個人被ばく線量計の応答特性の改善成果について、実際の放射線場で使用した時に計測される1cm 線量当量を比較することで評価した。個人線量計の使用を想定した放射線場は IAEA (International Atomic Energy Agency) のテクニカルレポート [24]を参照し、中性子エネルギースペクトルが大きく異なる3箇所を取り上げた。これらは、イギリスの加圧水型原子炉 (PWR, Pressurized Water Reactor) 内の燃料棒上部にあるパイルキャップ (Pile Cap) と呼ばれるエリア (以下 PWR (UK) という。)、スイスの加圧水型原子炉内にある原子炉から取り出した熱で蒸気を発生させる蒸気発生器 (Steam Generator) 近傍 (以下 PWR (Swiss) という。)、原子炉燃料取り扱い施設の MOX (Mixed Oxide) 燃料貯蔵庫 (以下 Reactor Fuel Treatment という。) であり、各中性子エネルギースペクトルは実測値である。各放射線場の中性子エネルギースペクトルを図 6-3 に示す。縦軸は単位レサジー当たりの中性子束、横軸は中性子エネルギーを示す。

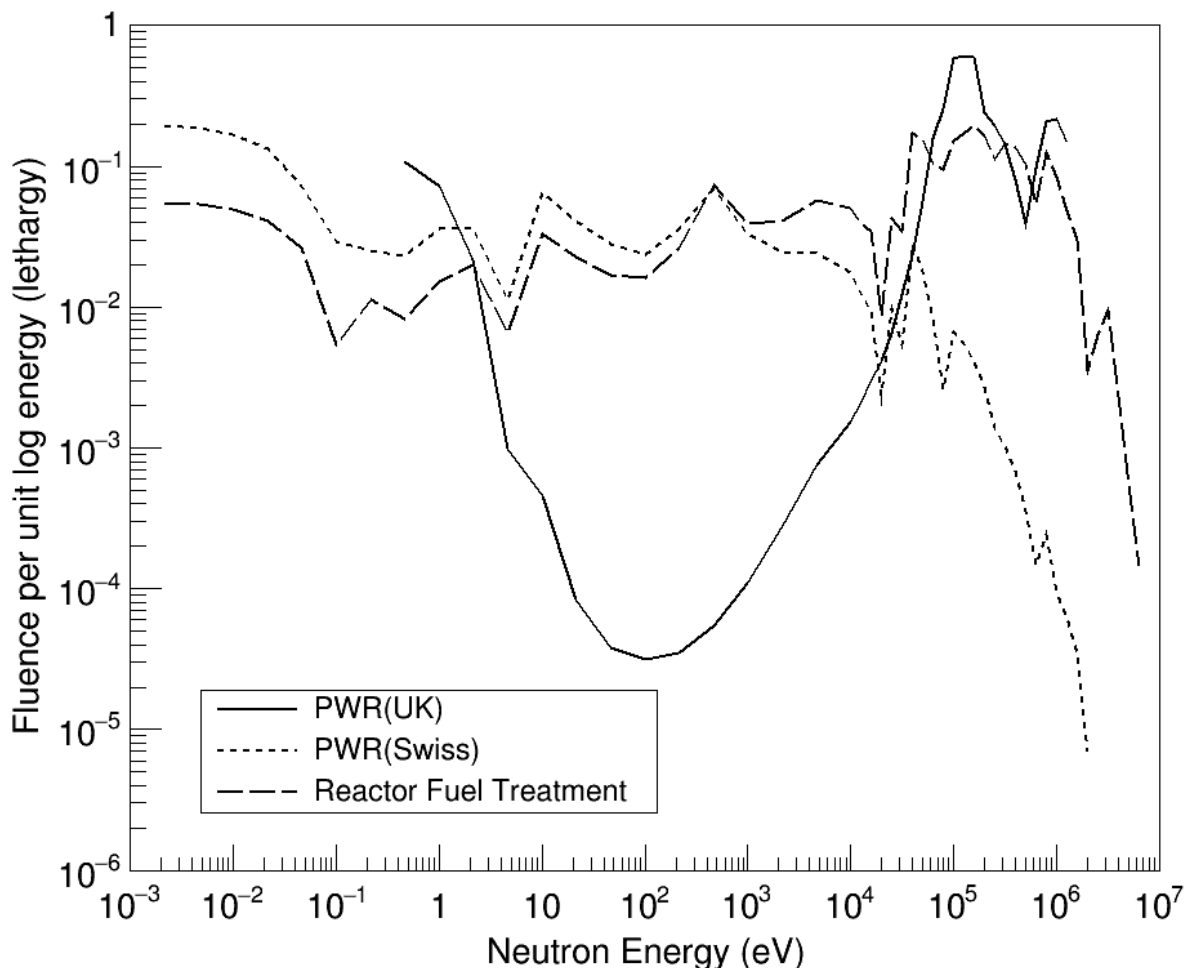


図 6-3 イギリスの加圧水型原子炉内の燃料棒上部にあるパイルキャップエリア (PWR (UK))、スイスの加圧水型原子炉の蒸気発生器近傍 (PWR (Swiss))、原子炉燃料取り扱い施設の MOX 燃料貯蔵庫 (Reactor Fuel Treatment) における中性子エネルギースペクトル [24]

これら3箇所の中性子エネルギースペクトル $\phi(E)$ に新型と従来型の個人線量計の応答特性 $R_{res}(E)$ を乗じて 1cm 線量当量 $H_p(10)$ を式 6-2 を用いて導出した。新型個人線量計にはカドミウム遮蔽を用いた新型熱中性子センサー（図 6-1 参照）を使用した。

$$H_p(10) = \int R_{res}(E) \phi(E) dE \quad (\text{式 6-2})$$

1cm 線量当量の評価結果を表 6-2 に示す。結果は中性子エネルギースペクトルに 1cm 線量当量換算係数を乗じた結果に対する比率で表している。表 6-2 の結果から、従来型個人線量計を本研究の新型個人線量計に置き換えることにより、3 箇所の放射線場で計測される 1cm 線量当量はエネルギースペクトルに換算係数を乗じた正しい 1cm 線量当量（以下、真値という）に対する比率が、PWR (UK) 内のパイルキャップ上部で 0.7 倍から 0.8 倍へ、PWR (Swiss) の蒸気発生器近傍で 2.2 倍から 1.1 倍へ、Reactor Fuel Treatment の MOX 燃料貯蔵庫内で 2.2 倍から 0.8 倍へと 1 倍に近づき、すなわち真値との一致度が増しており、線量計の応答特性が改善されたことがわかる。新型個人線量計を使用することで従来型センサーよりも真値に対して 20%以内の不確かさで 1cm 線量当量を測定できるようになった。

表 6-2 中性子エネルギースペクトルに 1cm 線量当量換算係数を乗じたときの結果（真値）に対する新型個人線量計と従来型個人線量計で測定した 1cm 線量当量の比率

放射線場	新型個人線量計 /真値	従来型個人線量計 /真値
PWR(UK) のパイルキャップ	0.8	0.7
PWR(Swiss) の蒸気発生器近傍	1.1	2.2
Reactor Fuel Treatment の MOX 燃料貯蔵庫内	0.8	2.2

新型個人線量計の応答特性の改善度を中性子エネルギー領域、すなわち本研究で改善した効果に分けて評価した。各放射線場における 1cm 線量当量の測定結果を3つのエネルギー領域、熱中性子～100keV、100keV～1.2MeV、1.2MeV 以上に分けて評価した結果を表 6-3 に示す。エネルギー領域が熱中性子～100keV が熱中性子センサー、100keV～1.2MeV が速中性子センサー、1.2MeV 以上が上限ディスクリ追加による応答特性改善の効果度合いを表している。

表 6-3 エネルギー領域ごとにおける 1cm 線量当量の評価結果

(a) PWR (UK) のパイルキャップ

中性子 エネルギー領域	中性子 フルエンス (cm ²)	1cm 線量当量		新型 /真値	1cm 線量当量	
		真値 (mSv)	新型 (mSv)		従来型 (mSv)	従来型 /真値
熱中性子～100keV	9.0×10^{-1}	7.8×10^{-7}	5.7×10^{-7}	0.7	1.1×10^{-6}	1.4
100keV～1.2MeV	6.7×10^{-1}	6.4×10^{-6}	4.0×10^{-6}	0.6	4.2×10^{-7}	0.1
1.2MeV～	4.3×10^{-2}	9.5×10^{-7}	2.2×10^{-6}	2.3	4.1×10^{-6}	4.3
全エネルギー領域	1.6×10^0	8.1×10^{-6}	6.8×10^{-6}	0.8	5.6×10^{-6}	0.7

(b) PWR (Swiss) の蒸気発生器近傍

中性子 エネルギー領域	中性子 フルエンス (cm^2)	1cm 線量当量		新型 /真値	1cm 線量当量	
		真値 (mSv)	新型 (mSv)		従来型 (mSv)	従来型 /真値
熱中性子 \sim 100keV	1.1×10^0	5.8×10^{-7}	6.7×10^{-7}	1.2	1.3×10^{-6}	2.3
100keV \sim 1.2MeV	5.4×10^{-3}	3.9×10^{-8}	6.6×10^{-9}	0.2	3.8×10^{-9}	0.1
1.2MeV \sim	2.8×10^{-5}	6.2×10^{-10}	1.4×10^{-9}	2.3	5.8×10^{-9}	9.3
全エネルギー領域	1.1×10^0	6.2×10^{-7}	6.8×10^{-7}	1.1	1.3×10^{-6}	2.2

(c) Reactor Fuel Treatment の MOX 燃料貯蔵庫内

中性子 エネルギー領域	中性子 フルエンス (cm^2)	1cm 線量当量		新型 /真値	1cm 線量当量	
		真値 (mSv)	新型 (mSv)		従来型 (mSv)	従来型 /真値
熱中性子 \sim 100keV	6.6×10^{-1}	5.8×10^{-7}	3.8×10^{-7}	0.7	7.8×10^{-7}	1.3
100keV \sim 1.2MeV	3.2×10^{-1}	3.7×10^{-6}	2.0×10^{-6}	0.5	2.0×10^{-7}	0.1
1.2MeV \sim	2.7×10^{-2}	5.9×10^{-7}	1.4×10^{-6}	2.3	9.8×10^{-6}	16.5
全エネルギー領域	1.0×10^0	4.9×10^{-6}	3.7×10^{-6}	0.8	1.1×10^{-5}	2.2

表 6-3(a)より、PWR (UK) 内の燃料棒上部にあるパイルキャップエリアで新型個人線量計を使用した場合、中性子エネルギー100keV \sim 1.2MeVにおける真値に対する割合が0.1倍から0.6倍に増加していることから、このエネルギー領域が線量計測の改善に大きく寄与していることがわかる。すなわち速中性子センサー応答特性の改善効果が表れている。表 6-3(b)より、PWR (Swiss) 内の蒸気発生器近傍で新型個人線量計を使用した場合、中性子エネルギー熱中性子 \sim 100keVにおける1cm線量当量の真値に対する割合が2.3倍から1.2倍に縮小していることから、このエネルギー領域が線量計測の改善に大きく寄与していることがわかる。すなわち熱中性子センサー応答特性の改善効果が表れている。表 6-3(c)より、Reactor Fuel Treatment の MOX 燃料貯蔵庫内で新型個人線量計を使用した場合、中性子エネルギー1.2MeV以上において真値に対して16.5倍の過大評価を2.3倍に縮小できたことにより、より正確に線量当量を計測できるようになった。すなわち、上限ディスクリレベルの効果が表れていることがわかる。

7. まとめ

反転薄型シリコンダイオードを熱中性子センサーと速中性子センサーに適用したセンサーを開発した。それぞれの応答特性と検出効率を実験とシミュレーション手法により評価検討し、両者を統合した中性子個人被ばく線量計のエネルギー応答特性も評価検討した。

新型速中性子センサーでは、反転薄型シリコンダイオードを使用することで、従来型速中性子センサーで測定できていなかったエネルギー1MeV以下の中性子を500keVから測定できるようになった。また、従来型速中性子センサーと比べて検出効率を最大9.3倍に増加させ、中性子検出感度を向上させたことで検出可能な最低中性子線量を下げることができた。これは反転薄型シリコンダイオードの二つの特徴によるものである。一つ目は、薄型化によるガンマ線感度の低下である。従来型速中性子センサーではシリコンダイオードのバルク部が大きく、ファネリング現象によりガンマ線感度が大きく出ていたが、反転薄型シリコンダイオードでは、空乏層を除くシリコン母体部を小さくしたことで、ファネリングの効果を抑え、ガンマ線感度を低下させることができた。二つ目は、反跳陽子のエネルギー損失の低下である。反転薄型シリコンダイオードでは、中性子入射面の不感層を薄くするために、シリコンダイオードを反転させている。これにより、反跳陽子が空乏層に入射する過程で起きるエネルギー損失を低下させることができた。また、ガンマ線弁別のためのディスクリに加えて、上限ディスクリを設定することでエネルギーの高い反跳陽子の成分を取り除き、中性子エネルギー780keV~2.5MeVでIEC61526の規定を満たすことができた。このことから2種類のディスクリレベルの設定により利用環境の中性子場に応じたエネルギー特性を持つ中性子個人被ばく線量計の設計が可能となった。

新型熱中性子センサーでは、100keV以上の検出効率の低下を改善するために、ラジエータにリチウム-6を用いて共鳴ピークを活用した。リチウム-6ラジエータの使用に際しては、センサーの検出効率がリチウム-6の核反応断面積に依存しないように、検出効率の中性子入射角度の依存性を評価し、前方からの中性子を遮蔽する構造が最適であるという結果が得られた。この構造により10keV以下の検出効率で、リチウム-6の核反応断面積に依存しない平坦なエネルギー特性を得ることができた。このエネルギー依存性が少ない特性は、遮蔽材により異なり、炭化ホウ素ゴムよりもカドミウム遮蔽のほうが優れていることが分かった。また、反転薄型シリコンダイオードを使用したことで、2次荷電粒子のエネルギー損失が低下し、従来型熱中性子センサーよりも高い中性子感度を得ることができ、最低検出可能な中性子線量を下げることができた。100keV以上の検出効率の改善では、リチウム-6の共鳴ピークにより検出効率の低下を防ぐことができた。しかしながら1cm線量当量換算係数に対する過小評価はまだ残っており、改善の余地があるといえる。

新型速中性子センサーと新型熱中性子センサーを組み合わせた中性子個人被ばく線量計のエネルギー応答特性の評価では、中性子エネルギー0.025eV~15MeVの幅広い範囲で従来型センサーよりも1cm線量当量換算係数に近いエネルギー特性が得られた。新型センサーは、従来型センサーよりもエネルギー応答特性と1cm線量当量換算係数比との一致度が向上し、放射線利用環境下における線量計測の信頼性を向上できた。3箇所の放射線場において従来型個人線量計を新型中性子個人被ばく線量計に置き換えることにより、真の線量当量に対して20%以内の不確定さで1cm線量当量を測定できるようになった。

反転薄型シリコンダイオードを使用することで中性子個人被ばく線量計の中性子エネルギー応答特性を改善することができた。1cm線量当量換算係数に対して過小評価となっていた中性子エネルギー範

100keV～1MeVに限らず、0.025eV～15MeVの幅広いエネルギー範囲で被ばく線量計のエネルギー応答特性と1cm線量当量換算係数との一致度向上を確認できた。また、中性子エネルギー応答特性の改善に加えて検出効率の上昇も確認でき、中性子検出感度を向上させることができた。

謝辞

はじめに、貴重な研究機会を与えて頂き、3年間ご指導頂きました防衛大学校理工学研究科 高田真志教授に深く感謝致します。実験や論文作成などすべての研究活動において基礎から丁寧にご指導頂き本当にありがとうございました。

本論文をまとめるにあたり審査頂きました防衛大学校理工学研究科 松元藤彦教授、松村徹准教授、名古屋大学大学院工学研究科 瓜谷章教授に深く感謝致します。

加速器の照射実験でご協力頂いた国立研究開発法人産業技術総合研究所 松本哲郎主任研究員と増田明彦主任研究員に深く感謝いたします。実験を通して様々なことを教えて頂き本当にありがとうございました。

社会人博士への挑戦を許可頂き、貴重な経験をさせて頂きました富士電機株式会社 放射線システム部 塩入正敏部長に深く感謝致します。社会人博士挑戦へのきっかけを作って頂き、様々な場面でご指導頂きました中村尚司技術顧問兼東北大学名誉教授と青山敬主席に深く感謝致します。実験、シミュレーション、論文作成でご助言及びご協力頂きました布宮智也課長補佐に深く感謝致します。反転薄型シリコンダイオードの詳細をまとめるにあたりご助言頂きました成田政隆主査に深く感謝致します。日常業務に加えて社会人博士としての活動をサポート頂きました在学中の課長であった中島定雄主席、水野裕元課長、和田清人課長に深く感謝致します。

最後に社会人博士への挑戦を後押しし、研究生活をサポートしてくれた家族に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 公益社団法人アイソトープ協会, “放射線利用統計 2019,” 2019.
- [2] 小島 久雄, “核燃料サイクル工学概論,” JAEA-Review 2008-020, 2008.
- [3] 山田 滋, 山本 直敬, 小藤 昌志, 今井 礼子, 粕谷 吾朗, 小此木 範之, 磯崎 由佳, 牧島 弘和, 辻 比呂志, 鎌田 正, “重粒子線治療の現状 -重粒子線治療の最新の治療成績と展望-,” RADIOISOTOPES, 68, 395-402, 2019.
- [4] 古林 徹, “加速器 BNCT 照射システムの特徴と将来性 -BNCT の原理からの発想-,” RADIOISOTOPES, 64, 13-28, 2015.
- [5] 小林 久夫, “中性子イメージング概論,” RADIOISOTOPES, 56, 207-210, 2007.
- [6] 池田 泰, “中性子イメージングの非破壊検査での役割,” RADIOISOTOPES, 56, 219-230, 2007.
- [7] 大塚 巖, “工業計測への放射線の応用,” J-STAGE 計測と制御, 5 巻 8 号, 591-598, 1966.
- [8] 株式会社千代田テクノ, “個人線量の実態,” FBNews No.537, 2021.
- [9] International Commission on Radiological Protection, “Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures,” ICRP Publication 116, 2010.
- [10] International Commission on Radiation Units and Measurements, “Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry,” ICRU Report 51, 1987.
- [11] International Commission on Radiologic Protection, “Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation,” ICRP Publication 74, 1996.
- [12] International Electrotechnical Commission, “Radiation protection instrumentation – Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters,” IEC61526, 2010.
- [13] 中村 尚司, 放射線物理と加速器安全の工学[第 2 版], 株式会社地人書館, 2001.
- [14] BUBBLE TECHNOLOGY INDUSTRIES, “BUBBLE DETECTOR PRODUCTS,” [オンライン]. Available: https://bubbletech.ca/product_type/bubble-detector-products/. [アクセス日: 2022-02-24].
- [15] 富士電機株式会社, “サーベイメータ・測定器,” [オンライン]. Available: <https://www.fujielectric.co.jp/products/radiation/servy/index.html>. [アクセス日: 2022-02-24].
- [16] 松添 雄二, 河村 岳司, 青山 敬, “個人線量モニタリングシステム,” 富士時報 Vol80.No.4, 2007.
- [17] MILION TECHNOLOGIES, “DMC 3000™ personal electronic dosimeter,” [オンライン]. Available: <https://www.mirion.com/products/dmc-3000-electronic-radiation-dosimeter>. [アクセス日: 2022-02-24].
- [18] 國岡 昭夫, 上村 喜一, 新版 基礎半導体工学 第 14 刷, 朝倉書店, 2008.
- [19] G. F. KNOLL 著, 木村逸郎, 阪井英二訳, “放射線計測ハンドブック 第 2 版,” 日刊工業新聞社, 1996.
- [20] T. Nakamura, M. Horiguchi, T. Suzuki, and T. Yamano, “A Real Time Wide Energy Range Personal Neutron Dosimeter with Two Silicon Detectors,” Radiat. Prot. Dosim., 27, 149-156, 1989.

- [21] T. Nakamura, M. Sasaki, O. Ueda, and T. Suzuki, "Characterisation of a Real time Personal Neutron Dosimeter with Two Silicon Detectors," *Radiat. Prot. Dosim.*, 85, 45-48, 1999.
- [22] T. Nunomiya, S. Abe, K. Aoyama, and T. Nakamura, "Development of Advanced type Multi functional Electronic Personal Dosimeter," *Radiat. Prot. Dosim.*, 126, 284-287., 2007.
- [23] 佐藤 則忠, 関 康和, "プラズマ CVD 法を用いて製作したヘテロ接合型シリコン放射線検出素子," *電気学会論文誌 C*, Vol. 112-C, No. 12, 1992.
- [24] International Atomic Energy Agency, "Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes," *Technical Reports Series No. 403*, 2001.
- [25] M. Sasaki, T. Nakamura, N. Tsujimura, O. Ueda, and T. Suzuki, "Development and Characterization of Real time Personal Neutron Dosimeter with Two Silicon Detectors," *Nucl. Instr. Meth.*, 418, 465-475., 1998.
- [26] M. Takada, T. Nunomiya, T. Nakamura, T. Matsumoto, and A. Masuda, "Characterization of a Thin Silicon Sensor for Active Neutron Personal Dosimeters," *Radiat. Prot. Dosim*, 170, 213-217, 2016.
- [27] 西沢 潤一, 新保 雅文, 奥野 保男, "エピタキシャル成長法の現状," *日本結晶学会誌*, 16, 87-103, 1974.
- [28] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura, "JENDL 4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 48, 1-30, 2011.
- [29] 中川 庸雄, 菊池 康之, 五十嵐 信一, 浅見 明, "中性子共鳴準位, (II) 共鳴パラメータの評価," *日本原子力学会誌*, Vol.23, No.10, 1981.
- [30] 館 秀樹, "電界放出型走査型電子顕微鏡," *ネットワークポリマー*, Vol. 33, No. 2, 2012.
- [31] International Electrotechnical Commission, "Radiation protection instrumentation - Neutron ambient dose equivalent (rate) meters," *IEC61005*, 2014.
- [32] H. Harano, T. Matsumoto, J. Nishiyama, A. Masuda, A. Uritani, and K. Kudo, "Recent activities on neutron standardization in Japan," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1, 138-141, 2011.
- [33] H. Harano, T. Matsumoto, J. Nishiyama, A. Uritani, and K. Kudo, "Accelerator based Neutron Fluence Standard of the National Metrology Institute of Japan," *AIP Conf. Proc.*, 1099, 915-918, 2009.
- [34] 石川 勇, "III. 中性子源 1. RI 中性子," *RADIOISOTOPES*, 45, 10, 1996.
- [35] T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, and K. Niita, "Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 55, 684-690, 2018.
- [36] J.F. Ziegler, J.B. Biersack, and U. Littmark, "The Stopping and Range of Ions in Matter," *Treatise on Heavy-Ion Science*, 1, 93-129, 1985.
- [37] H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman, and W.R. Nelson, "THE EGS5 CODE SYSTEM," *SLAC-R-730*, 2005.
- [38] M.J. Berger, J.S. Coursey, M.A. Zucker, and J. Cha, "NIST Standard Reference Database 124," NIST, [オンライン]. Available: <https://dx.doi.org/10.18434/T4NC7P>. [アクセス日: 2021-10-20].

- [39] Y. Abe, M. Takada, T. Nunomiya, K. Aoyama, T. Nakamura, T. Matsumoto, and A. Masuda, “Simulation of Neutron Response Functions of Silicon Sensor Applied to Real-Time Personal Albedo Neutron Dosimeter in the Energy Range between 0.01 eV to 10 keV,” *Radiat. Prot. Dosim.*, 196, 110-113, 2021.
- [40] Nicolas Soppera, OECD / NEA Data Bank, “JANIS Web,” [オンライン]. Available: <https://www.oecd-neo.org/janisweb/>. [アクセス日: 2022-01-02].
- [41] 公益社団法人日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 11 版, 丸善出版株式会社, 2016.
- [42] J. Nishiyama, H. Harano, T. Matsumoto, Y. Sato, A. Uritani, and K. Kudo, “Absolute measurement of activity of ^{198}Au foils using the $4\pi\beta\text{-}\gamma$ coincidence counting method and corrections by the Monte Carlo simulation,” *Radiat. Prot. Dosim.*, 148, 237–241, 2012.
- [43] International Atomic Energy Agency, “Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes,” Technical Reports Series No. 403, 2001.

研究業績

【投稿論文】

- (1) Yohei Abe, Masashi Takada, Tomoya Nunomiya, Kei Aoyama, Takashi Nakamura, Tetsuro Matsumoto, and Akihiko Masuda, “Simulation of Neutron Response Functions of Silicon Sensor Applied to Real-Time Personal Albedo Neutron Dosimeter in the Energy Range between 0.01 eV to 10 keV”, Radiation Protection Dosimetry, 196, 110-113, 2021.
- (2) Masashi Takada, Yohei Abe, Satoshi Nakamura, Akihiko Masuda, Tsuyoshi Kajimoto, and Satoru Endo, “Spectrometer Design of Low Energy Neutrons for Boron Neutron Capture Therapy”, Nucl. Instr. and Meths A, 1020, 165848, 2021.
- (3) Yohei Abe, Masashi Takada, Tomoya Nunomiya, Akihiko Masuda, Tetsuro Matsumoto, Masataka Narita, Kei Aoyama, and Takashi Nakamura, “Development of Fast Neutron Sensor Using a Back-Illuminated Thin PN Diode Applied to Real-Time Personal Dosimeter”, Nucl. Instr. And Meths. A, 1037, 166838, 2022.
- (4) Yohei Abe, Masashi Takada, Tomoya Nunomiya, Akihiko Masuda, Tetsuro Matsumoto, Masataka Narita, Kei Aoyama, and Takashi Nakamura, “Development of Slow Neutron Sensor Using a Back-Illuminated Thin PN Diode Applied to Real-Time Personal Dosimeter”, Nucl. Instr. And Meths. A, prepration (2022).
- (5) Yohei Abe, Masashi Takada, Tomoya Nunomiya, Akihiko Masuda, Tetsuro Matsumoto, Kei Aoyama, and Takashi Nakamura, “反転薄型シリコンダイオードを使用したリアルタイム中性子個人被ばく線量計の応答特性の評価, EVALUATION OF REAL-TIME PERSONAL NEUTRON DOSIMETER USING A BACK-ILLUMINATED THIN SILICON DIODE”, Proc. of the 36th WS on Radiation Detectors and Their Uses, KEK-PROCEEDINGS, accept (2022).

【特許】

- (1) 阿部洋平, 青山敬, 布宮智也, 成田政隆, “中性子検出器、これを備える個人被ばく線量計および中性子照射量モニタ、並びに中性子検出方法”, 2021-119672, 出願 (2021).

【学会発表】

- (1) Yohei Abe, Masashi Takada, Tomoya Nunomiya, Kei Aoyama, and Takashi Nakamura, “Neutron Response Functions of Real-Time Personal Dosimeters in the Energy Range between 0.01 eV and 10 MeV”, 19th Int. Conf. on Solid State Dosim., Hiroshima, Poster, 9/15-20 (2019).
- (2) Yohei Abe, Masashi Takada, Tomoya Nunomiya, Kei Aoyama, and Takashi Nakamura, “Neutron Energy Response Function of New Real-Time Neutron Dosimeter Using Silicon Sensor”, 20th Int. Conf. on Individual Monitoring., Budapest, Poster, 4/19-24 (2020). canceled.
- (3) 阿部洋平, 高田真志, 中村尚司, 青山敬, 布宮智也, 松本哲郎, 増田明彦 “リアルタイム中性子個人線量計の開発と応答特性評価に関する研究”, 日本原子力学会 2020 年秋の大会, Online, Oral, 9/16-18 (2020).
- (4) 阿部洋平, 高田真志, 布宮智也, 増田明彦, 松本哲郎, 青山敬, 中村尚司, “反転薄型シリコンダイオードを用いたリアルタイム中性子個人線量計の開発と応答特性の評価”, 第 36 回研究会「放射線検出器とその応用」, Online, Oral, 1/24-26 (2022).