

プラスチックシンチレータを使用した
臨界警報装置のエネルギー・方向特性の評価

(技術報告)

2004年8月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122 (代表)

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

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

2004

プラスチックシンチレータを使用した
臨界警報装置のエネルギー・方向特性の評価
(技術報告)

辻村憲雄*, 吉田忠義*

要 旨

現在、核燃料サイクル開発機構東海事業所では、再処理施設や MOX 燃料施設など計 6 施設に計 35 系統（検出器台数 105 台）の臨界警報装置が設置されている。このうち 34 系統はプラスチックシンチレータを使用した検出器 (RD120) である。本検出器は、1.5 インチ ϕ \times 2 インチ長のプラスチックシンチレータを電流モードで動作させた線量率型検出器であり、主として γ 線を検出することを目的に設計されているが、その動作原理上、中性子と例えば検出器構造材との相互作用で発生する二次 γ 線も検出する。

本研究では、RD120 検出器について、モンテカルロ計算により γ 線と中性子に対するエネルギーならびに方向特性を評価し、臨界事故時に発生する γ 線と中性子の混在放射線場での応答を調べた。その結果、熱中性子が混在する条件では、 γ 線のみを検知対象として設定された警報設定レベルが想定しているものよりも小さな臨界事故規模で臨界を検知する可能性が示唆された。

* 東海事業所 放射線安全部 線量計測課

Energy and Angular Responses of the Criticality Accident Alarm System Using Plastic Scintillator (Technical Document)

Norio TSUJIMURA* and Tadayoshi YOSHIDA*

Abstract

The Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai Works, has operated the spent fuel reprocessing plant and the MOX fuel fabrication plants. In these facilities, the criticality accident alarm systems (CAAS) have been installed to reduce the risk associated with fissile material operations. The CAAS consists of the current-mode-operated plastic scintillator and the 2 out of 3 voting system. This detector was designed to intend to detect gamma-rays and alarm triggering point has been set to 1.0-3.0mGy/h in photon dose to detect the minimum accident of concern. However, for a current-mode, a plastic scintillator is inevitably sensitive not only to primary gamma-rays but also to secondary gamma-rays produced by neutron capture reactions in the detector assembly.

The authors evaluated the energy and angular responses of the CAAS using a current-mode-operated plastic scintillator to gamma-rays and neutrons. The responses of the CAAS per tissue kerma to gamma-rays and neutrons were computed with the MCNP Monte Carlo code. As a result, reliable response functions were obtained. These results would serve the reassessment of the coverage area and actual triggering dose rate level in the mixed radiation field of gamma-rays and neutrons.

*1 Radiation Protection Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle Development Institute

目 次

1. はじめに	1
2. 臨界警報装置の仕様	2
2.1 臨界警報装置の構成	2
2.2 検出器の仕様	2
3. 実験および計算方法	3
3.1 実験方法	3
3.2 計算方法	3
3.3 コンクリート壁の影響	3
4. 結果	4
4.1 F6 tally と F8 tally の比較	4
4.2 自由空間中での特性	4
4.3 コンクリート壁取り付け時の特性	4
4.4 γ 線・中性子混在条件での応答	5
5. おわりに	7
謝辞	8
参考文献	8

表目次

表 1	臨界事故時に想定される γ 線および中性子の混在場における RD120 の応答	9
-----	---	---

図目次

図 1	RD120 の外観写真	10
図 2	パルス幅と検知信号の発生に必要な線量（線量率）の関係	10
図 3	MCNP-4B の計算モデル	11
図 4	Tally の選択による単位 γ 線フルエンス当りのプラスチックシンチレータ中 でのエネルギー沈着の比較	12
図 5	RD-120 の γ 線に対するエネルギー特性（自由空間中， 0° 入射条件）	13
図 6	RD-120 の中性子に対するエネルギー特性（自由空間中， 0° 入射条件）	13
図 7	RD-120 の ^{60}Co γ 線に対する方向特性（自由空間中）	14
図 8	RD-120 の熱中性子に対する方向特性（自由空間中）	14
図 9	核分裂中性子をコンクリート壁に入射させたときのビーム径と 後方散乱熱中性子フルエンスと二次 γ 線によるカーマの関係	15
図 10	RD-120 の γ 線に対するエネルギー特性（コンクリート壁上， 0° 入射条件）	16
図 11	RD-120 の中性子に対するエネルギー特性（コンクリート壁上， 0° 入射条件）	16
図 12	RD-120 の ^{60}Co γ 線に対する方向特性（自由空間中とコンクリート壁上の 比較）	17
図 13	RD-120 の熱中性子に対する方向特性自由空間中とコンクリート壁上の 比較）	17
図 14	2 種類の臨界条件（ PuO_2 粉末，硝酸 Pu 溶液 30L）における γ 線と中性子のスペクトル	18

1. はじめに

現在、核燃料サイクル開発機構東海事業所では、再処理施設やMOX燃料施設などの計6施設に計35系統（検出器台数105台）の臨界警報装置が設置されている。これらの臨界警報装置は、1980年頃から国内メーカーとの共同により開発したもので、このうち34系統はプラスチックシンチレータを使用した γ 線検出器（RD-120）、残る1系統は濃縮 ^{235}U コンバータと表面障壁型半導体検出器からなる中性子検出器（RD-624）である[1]。後者の検出器は再処理施設の溶液取扱工程のうち十分な厚さの鉄遮へいがなされた特定の区域にのみ設置されているもので、それ以外の施設・工程については全て γ 線検出器が設置されている。

γ 線検出器（RD-120）は、1.5インチ ϕ ×2インチ長さのプラスチックシンチレータ（NE102A）を電流モードで動作させた線量率型検出器である。光電子増倍管のアノード電流出力を電圧に変換し、その電圧の増量値を監視している。この検出器は、元来、 γ 線を検出することを目的に設計されているが、その検出原理上、中性子と例えば検出器構造材との相互作用によって発生する二次 γ 線も検出する。このため、 γ 線と中性子の混在条件においては、 γ 線だけを検出すると想定した場合に比べて高い検出器応答が得られる可能性がある。そのため、 γ 線と中性子に対するエネルギー並びに方向特性をモンテカルロ計算によって評価し、 γ 線—中性子混在場における応答特性を調べた。

2. 臨界警報装置の仕様

2. 1 臨界警報装置の構成

臨界警報装置は、臨界事故に伴って放出される放射線を検出する「検出部」、検出された信号に基づき臨界事故と判定する「判別部」、臨界事故と判定された場合に警報を発生する「警報発生部」からなる。検出部の写真を図1に示す。

「検出部」は3台の検出器からなり、臨界事故に伴って放出されるγ線等による線量率があらかじめ設定した数値を超えた場合に検知（トリップ）信号を判別部へ伝達する。

「判別部」は、3台の検出器のうち2台以上からのトリップ信号を0.5秒以内に受けた場合に、警報発生部に警報の起動信号を伝達する。「警報発生部」は、判別部で臨界事故と判定された場合に、施設内作業員に対して所定区域からの迅速な退避を促すため、他の警報と識別可能な可聴音警報ならびに回転灯の起動信号を施設内全域に設置したホーンブローア、回転灯に伝達する。

2. 2 検出器の仕様

臨界警報装置に使用している検出器 RD-120 の仕様を以下に示す。本検出器は、1.5インチφ×2インチ長さのプラスチックシンチレータ (NE102) を電流モードで動作させた線量率型検出器であり、光電子増倍管のアノード電流出力を電圧に変換し、その電圧の増量値を監視している。

- ・検出方式 : プラスチックシンチレータ (NE102A) + 光電子増倍管 (浜松ホトニクス R878) による電流出力方式
- ・プリアンプ : 入力 0~20μA (0~500mR/h に相当)
- ・出力電圧 : 1.4~5V (0~500mR/h に相当)
- ・測定線量率範囲: 0~4.35mGy/h*1 (0~500mR/h)
- ・トリップレベル: 0~4.35mGy/h (0~500mR/h) 間で任意に設定可能

(1) 過負荷特性

過負荷特性についてはγ線約 260mGy/h まで調査されており、過電圧保護回路により約 5mGy/h 以上で一定値の電圧出力 (約 5V) を示す[2]。

(2) パルス放射線に対する特性

バーストの継続時間は臨界事故の体系などに依存し、過去の臨界事故の経験、核暴走実験データを考慮すると 1msec 程度の短いものから 1 分間以上にわたるものまである。線量率型検出器である RD120 の場合、回路時定数 (1msec) に比べて短いパルス幅の放射線に対しては警報設定レベルを超えても警報を発生しない場合がある。そこで、電気パルスを用いて検出器電流をシミュレートすることにより、警報を発生する条件 (線量率とパルス幅の関係) を調べた。結果を図2に示す。図はトリップレベルを 1.75mGy/h に設定した場合の結果であるが、パルス幅が 1msec の場合、検知信号の発生には設定したトリップレベルの約 2 倍の線量率が必要になる[2]。また、日本原子力研究所の NSRR でバースト状放射線の照射試験を実施し、8.8R/20msec (約 80mGy/20msec, 積算線量) で正常動作することが確認されている。

*1 1R=8.7mGy として換算。

3. 実験および計算方法

3. 1 実験方法

^{137}Cs γ 線と線質指標 **0.7** の **X** 線 (実効エネルギー**35~180keV**) を照射し, アナログ出力電圧をデジタルボルトメータで測定した。測定にあたっては, 適当なサンプリング間隔で出力電圧を **10** 回読み取りその平均をとった。本実験によって得られた空気カーマ率 (**mGy/h**) と出力電圧 (**V**) の関係を用いて後述する計算結果を検出器の出力電圧に変換した。

3. 2 計算方法

RD-120 のエネルギーおよび方向特性の評価にあたってモンテカルロ計算コード **MCNP-4B[3]** を使用した。

MCNP による計算では, プラスチックシンチレータ (**NE102A**, 比重 **1.032**, **H/C=1.104**) のほか, アルミニウムハウジング, 光電子増倍管 (ホウ珪酸ガラスとコバールなどからなる比重 **0.65** の一様な混合物として近似**[4]**), 筐体 (冷間圧延鋼板 **2~4mm**), 壁面への取り付け板 (ベークライト) などをモデル化した。**図 3** に計算モデルを示す。線源として, 単色 γ 線 (**100keV~10MeV**), 単色中性子 (熱中性子 **~10MeV**) のほか, 臨界事故時における γ 線及び中性子スペクトルを用い, これらを筐体の外から入射させた場合におけるプラスチックシンチレータ中の γ 線 (電子) によるエネルギー沈着を **F6 tally (track length cell energy deposition tally)** および **F8 tally (pulse height tally)** で計算した。一方, 方向特性については, 線源面を固定した状態で座標変換カード指定により計算体系を **15°** ステップで回転させることによって同様に計算した。

なお, 計算では, 電子のエネルギーが局所的に付与されると仮定する **F6 tally** と, **Integrated TIGER** シリーズ**[5]**と同様の電子/ γ 線輸送理論に基づき電子を追跡する **F8 tally** とをまず比較し, 以降の計算で使用する **tally** を選定した。また, 一部の計算において電磁カスケードモンテカルロコード **EGS4[6]** を使用し, **MCNP** による計算の妥当性チェックに用いた。

3. 3 コンクリート壁の影響

RD-120 を取り付けるコンクリート壁面からの後方散乱線による **RD-120** の応答への影響を **MCNP 4B** で計算した。ここでは, ビーム径を変えて中性子をコンクリート壁面に入射させ, 検出器位置における熱中性子フルエンスなどの後方散乱および二次 γ 線フルエンスが飽和する範囲をはじめに決定した。その計算結果をもとに, 単色 γ 線と単色中性子に対すると特性をあらためて計算した。

4. 結果

4. 1 F6 tally と F8 tally の比較

図 4 に γ 線入射時における単位フルエンス当たりのプラスチックシンチレータ中のエネルギー沈着[MeV/g]を示す。図にはプラスチックシンチレータのみに γ 線を入射させた場合と RD120 の筐体全体に γ 線を入射させた場合の計算結果を示した。プラスチックシンチレータのみに γ 線を入射させた場合、 γ 線のエネルギーが高くなるほどその体系中での電子平衡が成立しなくなるため、F6 tally と F8 tally の不一致は大きくなる。一方、RD120 全体に γ 線を入射させた場合、F6 tally と F8 tally は 5MeV 以下で $\pm 8\%$ 以内、10MeV でも $\pm 20\%$ 以内で一致する結果となった。また、熱中性子入射による二次 γ 線によるエネルギー沈着計算においても F6 tally と F8 tally は $\pm 10\%$ 以内で一致した。電子/ γ 線の挙動を追跡する F8 tally は、 γ 線のみを追跡する F6 tally に比べて極端に計算時間がかかるため、上記の結果から、以後の計算では全て F6 tally を使用することとした。

4. 2 自由空間中での特性

図 5 に γ 線入射時における空気カーマ当たりのレスポンスを示す。ここでは ^{137}Cs に対する値で規格化している。図には実験値のほか、EGS4 による計算値 (59.5keV, 662keV 並びに水素の捕獲 γ 線 2.2MeV)、Hubbell の質量エネルギー吸収係数[7]から予想されるレスポンスも参考までに示した。MCNP による計算値は EGS4 による計算値および実験値によく一致している。約 500keV 以上でエネルギーに依存しない平坦なレスポンスを有していることが分かる。300keV 未満から急激にレスポンスが下がっているがこれは RD-120 の筐体 (鋼板 4mm) によって入射する γ 線が減衰しているためである。このため、RD-120 は MOX 燃料施設における主たる γ 線源である ^{241}Am の γ 線 (60keV) には感度を持たない。なお、RD-120 は、通常 ^{137}Cs の γ 線に対してその検知レベルを設定しているが、核分裂に伴って発生する即発 γ 線 (平均エネルギー約 0.9MeV)、水素の捕獲 γ 線 (約 2.2MeV) に対する相対感度の方がむしろ ^{137}Cs の γ 線に対する感度よりも高いことが分かった。

図 6 に中性子入射時における組織吸収線量当りのレスポンスを計算した結果を示す。ここでは図 4 と同様に ^{137}Cs γ 線に対する空気カーマ当たりのレスポンスで縦軸を規格化している。低エネルギー領域では、主に圧延鋼板中での $\text{Fe}(n,\gamma)$ およびプラスチックシンチレータ中での $\text{H}(n,\gamma)$ 反応によって発生する捕獲 γ 線がプラスチックシンチレータで検出されるので、中性子に対しても高い相対感度を有している。また、約 1MeV を超えるエネルギー領域では主に $\text{Fe}(n,n'\gamma)$ などの非弾性散乱に伴って発生する γ 線も検出するが線量当りに換算すると感度としては低い。

方向特性の計算結果を ^{60}Co γ 線、熱中性子についてそれぞれ図 7、図 8 に示す。 γ 線については光電子増倍管側から入射した場合にわずかにレスポンスが下がる。一方、中性子 (熱中性子) については、 $15\sim 75^\circ$ の範囲で 0° 入射時よりもレスポンスが増加している。これは、入射角度の変化に伴い圧延鋼板のシルエット面積が変化し、二次 γ 線の供給源である圧延鋼板への熱中性子の入射数が増えるためと考えられる。

4. 3 コンクリート壁取り付け時の特性

RD-120 をコンクリート壁に取り付けた場合の特性を計算するにあたって、まずその計算条件を決定した。比重 2.1 のタイプ 2A コンクリートからなる直径 4.0m、厚さ 30cm の円板状コンクリートを想定し、その中心軸上にプラスチックシンチレータの実効中心

を置いた体系で、コンクリートに入射させる熱中性子のビーム径を変えながら、プラスチックシンチレータ位置における熱中性子フルエンスと空気カーマの変化を調べた。計算結果を図9に示す。この結果から、ビーム径が3.2m近傍で、熱中性子フルエンスおよび空気カーマがともに飽和することが分かった。このため、RD-120のレスポンスの計算においては、コンクリートに入射する放射線のビーム径を3.2mに固定した。

図10に、コンクリート壁にRD-120を取り付けたときの、0°入射条件におけるRD-120のγ線に対する空気カーマ当たりの特性を示す。コンクリート壁からの後方散乱γ線によって、¹³⁷Cs付近のエネルギー領域で約10%レスポンスが増加する。300keV以上では空気カーマに対してほぼ平坦なレスポンスを持つ。

図11に、0°入射条件における中性子組織吸収線量当たりのレスポンスを示す。ここでは、¹³⁷Csγ線に対する空気カーマ当たりのレスポンスを1に規格化した。コンクリート壁から反射される中性子（特に熱中性子）と検出器材（鉄・水素）との反応による二次γ線、コンクリート中で発生する二次γ線によってレスポンスが著しく増加している。

図12に自由空間中およびコンクリート壁上における⁶⁰Coγ線に対する方向特性を示す。γ線の場合、コンクリート壁からの後方散乱線はレスポンスに高々10%程度しか影響しないため、コンクリート壁上であっても自由空間中の方向特性とほとんど変わらない。

図13に自由空間中およびコンクリート壁上における中性子に対する方向特性を示す。線源スペクトルにはSILENE炉（遮へい無し、速中性子から熱中性子にわたるエネルギー分布を持つ）の漏洩スペクトル[8]を使用した。自由空間中で熱中性子を照射した場合に比べて方向特性が大きく変化しており、RD120の筐体に直接入射する成分よりも後方散乱成分の方がよりレスポンスへの寄与の方が大きいことを表している。60°入射で正面入射の6割程度になる。

4. 4 γ線・中性子混在条件での応答

臨界事故時におけるγ線・中性子スペクトルに対するRD-120の応答を計算した。ここでは、RD-120が設置されている工程（溶液取扱工程と粉末取扱工程）を考慮して設定された、以下に示す2種類の臨界事故条件のスペクトルを使用した[9]。

1) PuO₂粉末，酸化物密度 11.46g/cm³，質量 28.2kg-Pu

2) 硝酸Pu溶液，濃度 40.0g-Pu/L，体積 30.0L

さらに遮へい体としてコンクリート50cmならびに鉄10cmを想定した。図14にγ線および中性子のスペクトルを示す。

上記のγ線・中性子スペクトルに対してMCNPで計算したレスポンスを表1に示す。ここでは、γ線による組織吸収線量率を1Gy/hとしたときの中性子組織吸収線量率、γ線・中性子それぞれについて予想されるRD-120の指示値ならびに両者の合計の指示値も示した。なお、表では¹³⁷Csγ線の空気カーマ当たりのレスポンスを1に規格化している。

¹³⁷Csγ線に対するレスポンスと臨界事故時のγ線スペクトルに対するレスポンスを比べると両者はほぼ同等であった。RD-120は通常¹³⁷Csのγ線照射試験によって検知レベルを決定しているが、本計算結果からそれが妥当であることが確認された。一方、中性子については、自由空間中で約0.003~0.26、コンクリート壁に取り付けた場合で約0.05~1.3のレスポンスを持つことが分かった。特にコンクリート遮へいなどによって熱中性子フルエンスの割合が全フルエンスの70%を超えるようなスペクトル、例えば表1で言うコンクリート50cm遮へい、では、γ線に対する指示値よりもむしろ中性子に対する指示値の方が大きい。γ線と中性子の混在割合にも依存するが、熱中性子が混在する条件ではRD-120の指示値のうち中性子による寄与が占める割合は大きく、γ

線のみを検知対象として設定された検知レベルが想定しているものよりも小さな臨界事故規模で臨界を検知する可能性がある。

5. おわりに

東海事業所で使用している臨界警報装置用の γ 線検出器 **RD-120** のエネルギーおよび方向特性をモンテカルロ計算により評価した。

その結果、

- γ 線については、**500keV** 以上でエネルギーに依存しない平坦なレスポンスを有している。
- 中性子については、筐体の圧延鋼板やプラスチックシンチレータ中で発生する捕獲 γ 線を検出するため、特に低エネルギー中性子に対して高い感度を持つ。
- 光電子増倍管側から入射すると感度が少し下がる。
- コンクリート壁に取り付けた場合、 γ 線については約**10%**程度感度が增加する。一方、中性子については、全エネルギー範囲にわたって一桁程度感度が增加する。

ということが分かった。

さらに、粉末取扱工程および溶液取扱工程における臨界条件を特定し、その条件下における γ 線・中性子スペクトルに対する応答を計算した。その結果、 ^{137}Cs γ 線に対するレスポンスと臨界事故時の連続スペクトルを持つ γ 線に対するレスポンスは同等であることが分かった。**RD-120** は通常 ^{137}Cs の γ 線照射試験によって検知レベルを決定しているが、本計算結果からそれが妥当であることが確認された。

また、 γ 線と中性子の混在条件では、中性子による指示値もトータルの指示値の内数として必ず含まれることになる。その割合は、中性子スペクトルや中性子と γ 線の混在割合によって大きく変化するが、特に熱中性子フルエンスの相対割合が多い場合には**RD-120**のトータル指示値のうち中性子に指示値が γ 線による指示値を超える場合がある。このため、実際の臨界事故においては、 γ 線のみを検知対象として設定された検知レベルが想定しているものよりも小さな臨界事故規模で臨界を検知すると考えられる。

謝辞

光電子増倍管の構造, 材質等について情報を提供いただきました浜松ホトニクス of 吉沢祐二氏に感謝します。

参考文献

- [1] 野田喜美雄：“臨界警報装置の開発”，動燃技報，No.81，p.59-62 (1992).
- [2] 岸本洋一郎, 他：“改良型臨界警報装置の試作・試験結果”，JNC TN841 82-53 (1982).
- [3] J.F.Briesmeister (Ed.)：“A general Monte Carlo N-particle code, version 4B – Manual”，LA-12625-M (Los Alamos National Laboratory) (1997).
- [4] 浜松ホトニクス株式会社：私信 (2003).
- [5] J.Halbleib et al.,：“ITS Version 3.0: The Integrated TIGER Series of Coupled Electron/Photon Monte Carlo Transport Codes”，SAND91-1634 (Sandia National Laboratory) (1992).
- [6] W.R.Nelson, H.Hirayama and D.W.O.Rodgers：“EGS4 Code System”，SLAC-Report-265, (1985).
- [7] J.F.Hubbell：“Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficients from 1keV to 20MeV”，Int.J.Appl.Radiat.Isot., Vol.33, p.1269-1290 (1980).
- [8] IAEA：“Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purpose”，Technical Report Series No.403, International Atomic Energy Agency (2001).
- [9] Y.Shimizu and T.Oka：“Study on the Detection of the Criticality Accident Alarm Systems and Area Monitors”，The 7th International Conference on Nuclear Criticality Safety (ICNS2000), (2003).

表1 臨界事故時に想定されるγ線および中性子の混在場における RD-120 の応答

(1) 自由空間中

Source or Critical Assembly	Shield Thickness	E _φ , MeV		Tissue Absorbed Dose, Gy/h			Response			RD-120 Output, Gy/h		
		Photon	Neutron	Photon Dp	Neutron Dn	Total Dt	Photon Rp	Neutron Rn	Total Rn	Photon Dp×Rp	Neutron Dn×Rn	Total
Cs-137	-	0.66	-	1.0	-	1.0	0.91*	-	-	0.91	-	0.91
Cf-252	-	-	2.1	-	1.0	1.0	-	-	<0.01	-	0.007	<0.01
PuO ₂ powders	-	1.4	1.4	1.0	4.3	5.3	0.95	<0.01	<0.01	0.95	0.02	0.97
	Concrete 50cm	1.8	0.20	1.0	0.44	1.4	0.95	0.25	0.25	0.95	0.11	1.1
Pu(NO ₃) ₄ 30L	Steel 10cm	1.3	0.62	1.0	23	24	0.94	<0.01	<0.01	0.94	0.07	1.0
	-	0.88	0.82	1.0	0.17	1.2	0.92	0.04	0.04	0.92	0.01	0.93
Pu(NO ₃) ₄ 30L	Concrete 50cm	1.3	0.21	1.0	0.18	1.2	0.94	0.26	0.26	0.94	0.05	0.99
	Steel 10cm	1.2	0.55	1.0	1.8	2.8	0.94	<0.01	<0.01	0.94	0.01	0.95

(2) コンクリート壁

Source or Critical Assembly	Shield Thickness	E _φ , MeV		Tissue Absorbed Dose, Gy/h			Response			RD-120 Output, Gy/h		
		Photon	Neutron	Photon Dp	Neutron Dn	Total Dt	Photon Rp	Neutron Rn	Total Rn	Photon Dp×Rp	Neutron Dn×Rn	Total
Cs-137	-	0.66	-	1.0	-	1.0	0.97	-	-	0.97	-	0.97
Cf-252	-	-	2.1	-	1.0	1.0	-	-	0.05	-	0.05	0.05
PuO ₂ powders	-	1.4	1.4	1.0	4.3	5.3	1.0	0.06	0.06	1.0	0.26	1.3
	Concrete 50cm	1.8	0.20	1.0	0.44	1.4	1.0	1.2	1.2	1.0	0.52	1.5
Pu(NO ₃) ₄ 30L	Steel 10cm	1.3	0.62	1.0	23	24	1.0	0.09	0.09	1.0	2.0	3.0
	-	0.88	0.82	1.0	0.17	1.2	0.99	0.21	0.21	0.99	0.04	1.0
Pu(NO ₃) ₄ 30L	Concrete 50cm	1.3	0.21	1.0	0.18	1.2	1.0	1.3	1.3	0.99	0.22	1.2
	Steel 10cm	1.2	0.55	1.0	1.8	2.8	1.0	0.14	0.14	1.0	0.24	1.2

* 空気カーマ当たりのレスポンスを1に規格化している。



図1 RD-120の外観写真

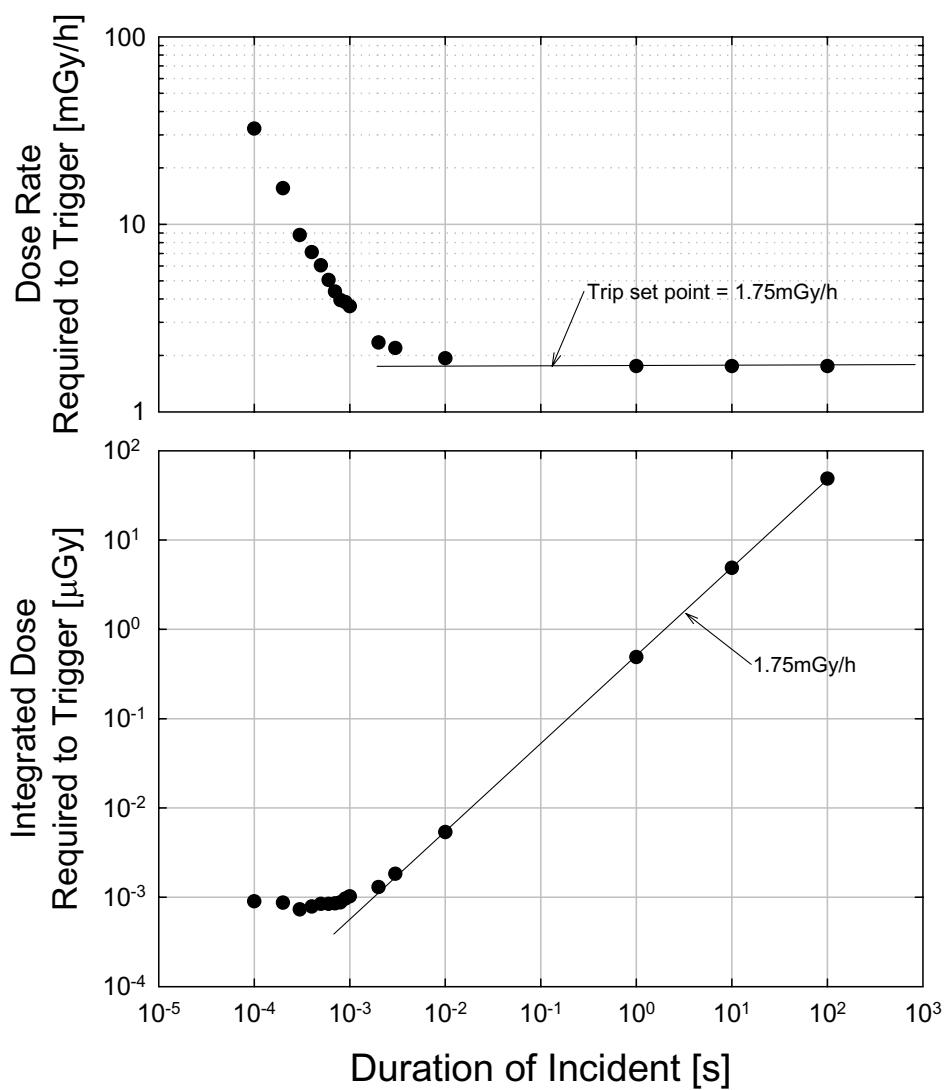


図2 パルス幅と検知信号発生に必要な線量（線量率）の関係
 （トリップレベルを空気カーマ率 1.75mGy に設定した状態での電気パルス試験による）

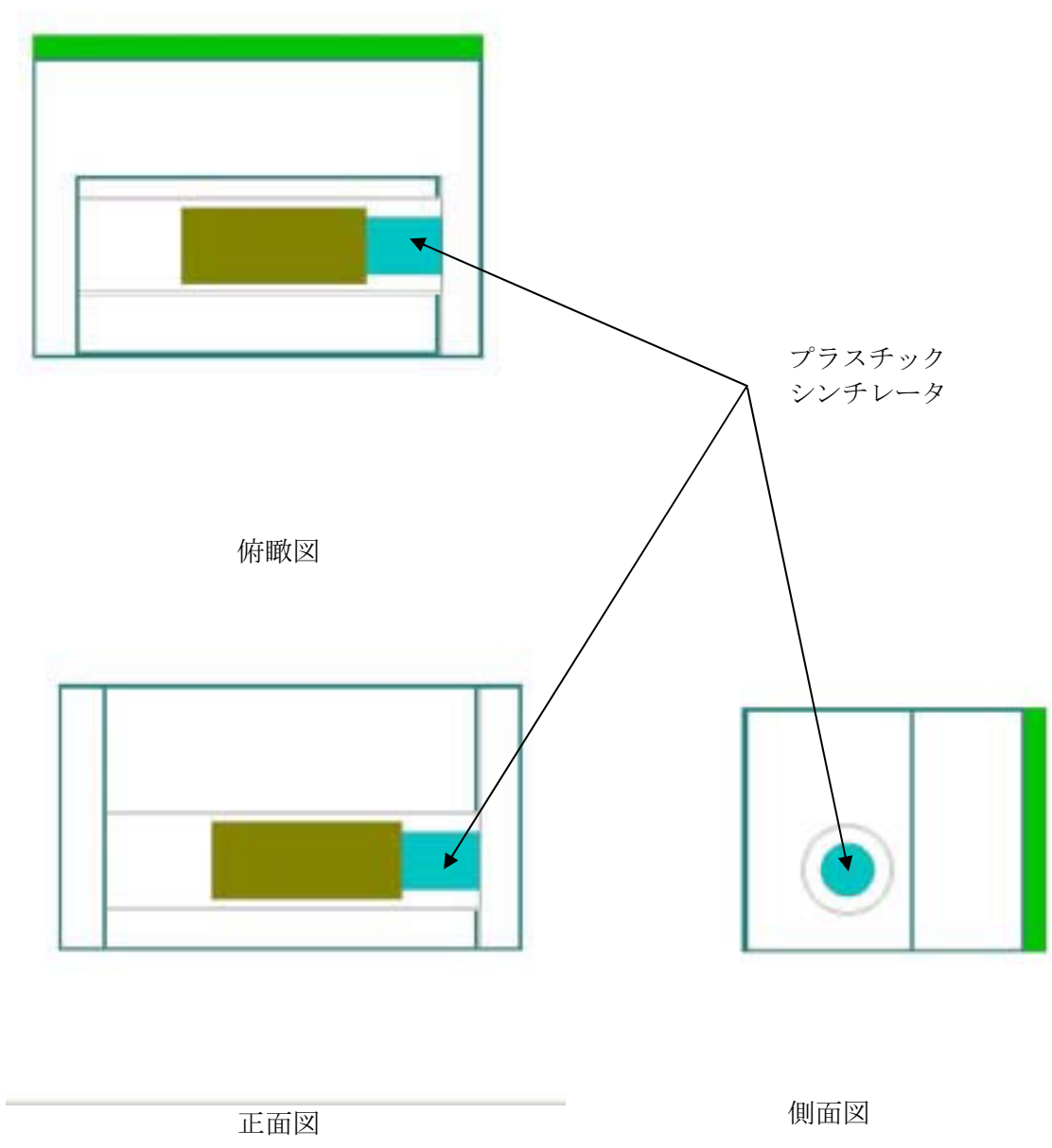


図3 MCNP-4B の計算モデル

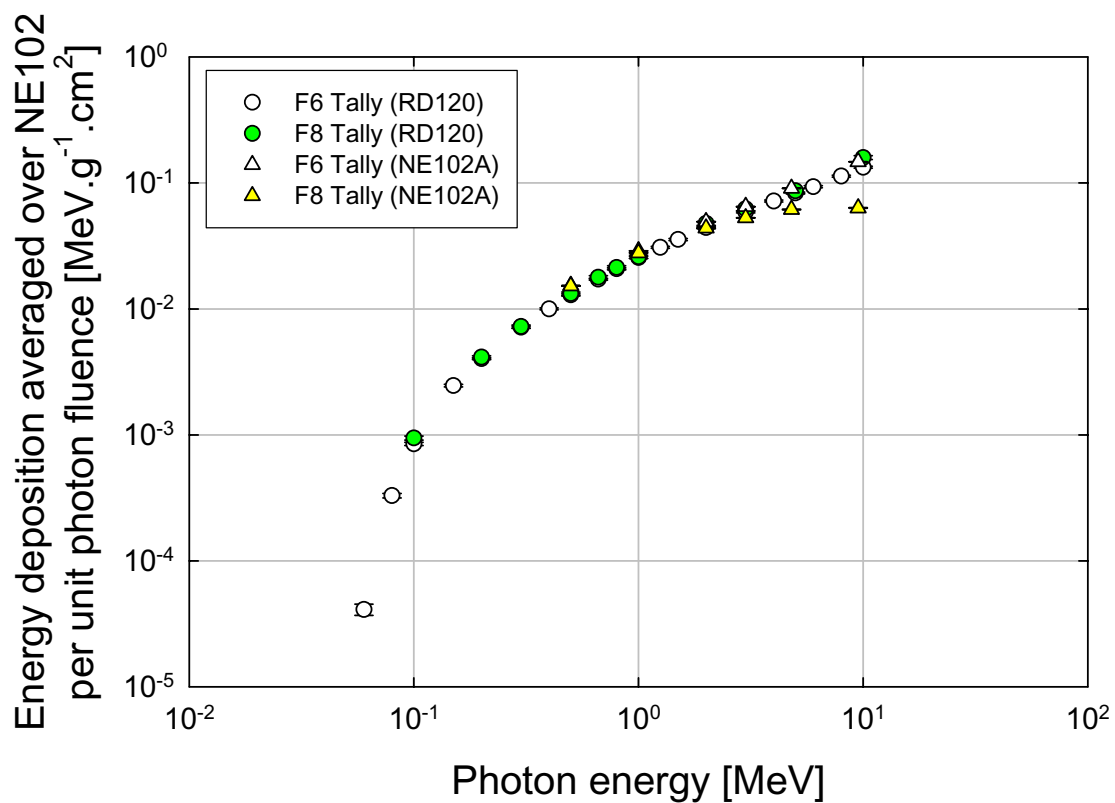


図4 Tally の選択による単位γ線フルエンス当りのプラスチックシンチレータ中でのエネルギー沈着の比較

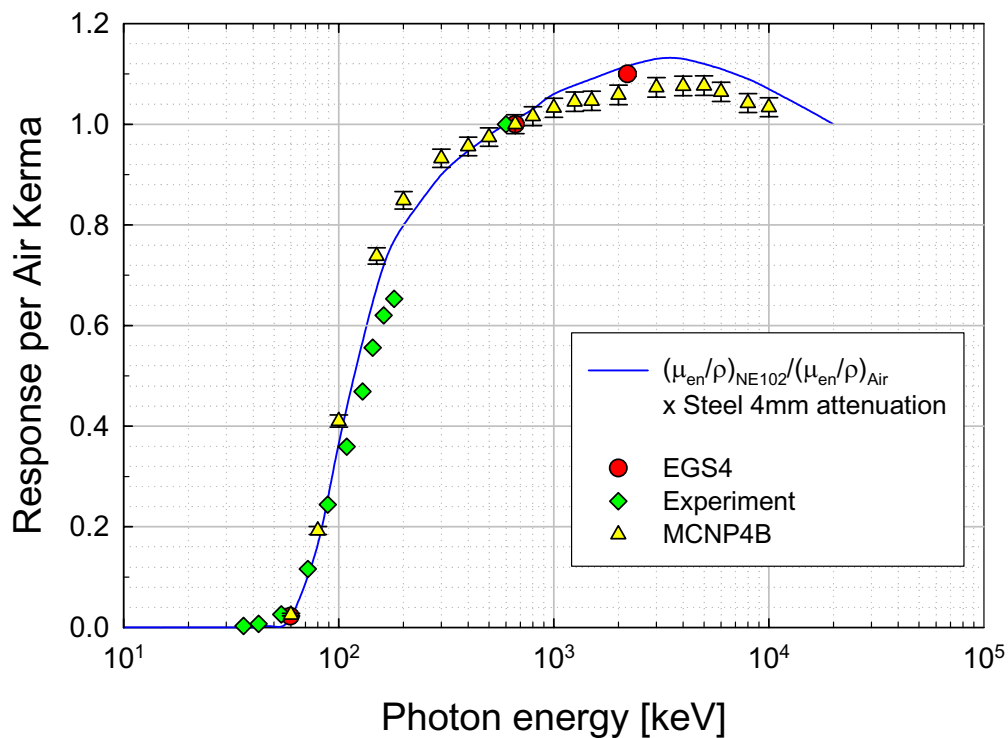


図5 RD-120 の γ 線に対するエネルギー特性 (自由空間中, 0° 入射条件)

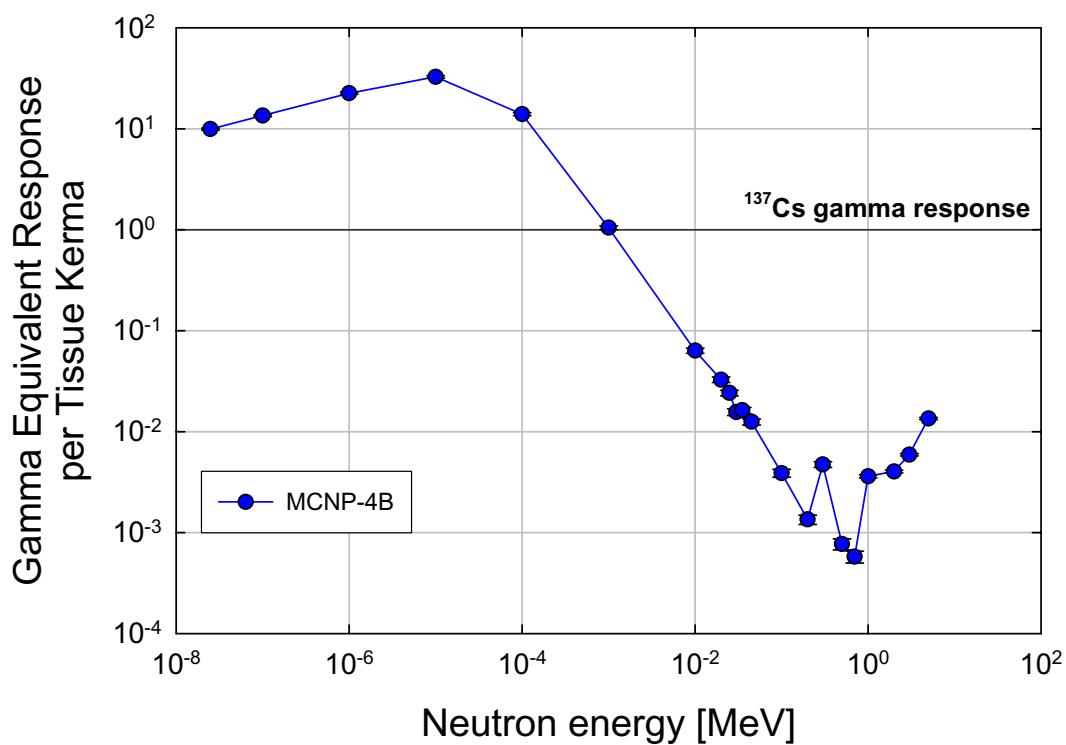


図6 RD-120 の中性子に対するエネルギー特性 (自由空間中, 0° 入射条件)

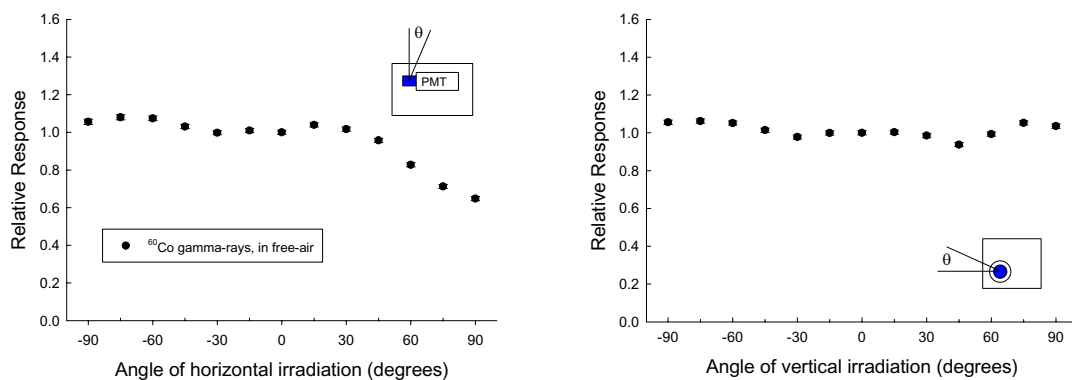


図7 RD-120 の ^{60}Co γ 線に対する方向特性 (自由空間中)

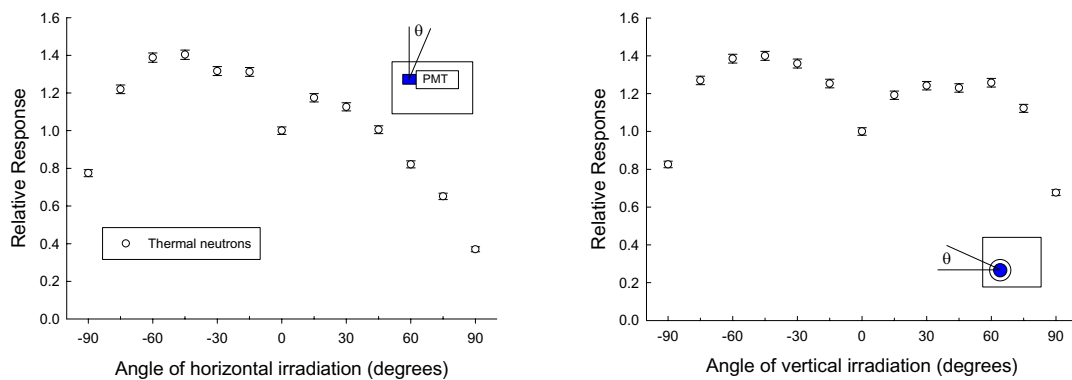


図8 RD-120 の熱中性子に対する方向特性 (自由空間中)

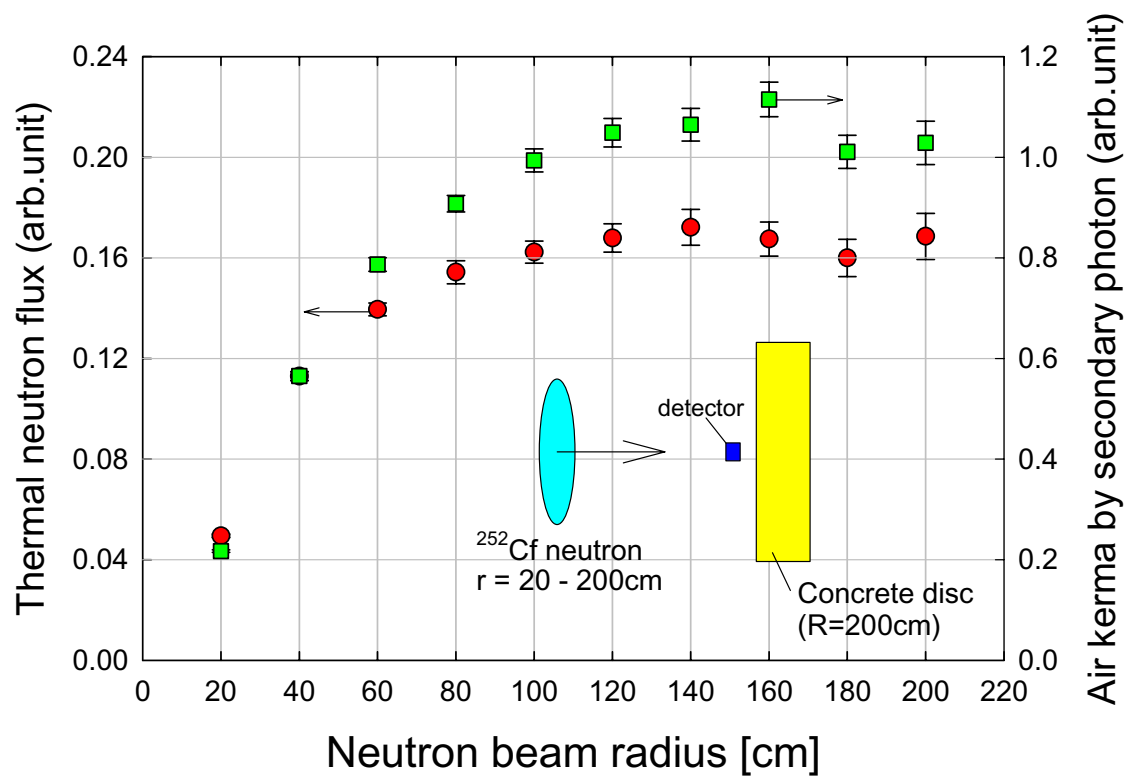


図9 核分裂中性子をコンクリート壁に入射させたときの
 ビーム径と後方散乱熱中性子フルエンスと二次γ線によるカーマの関係

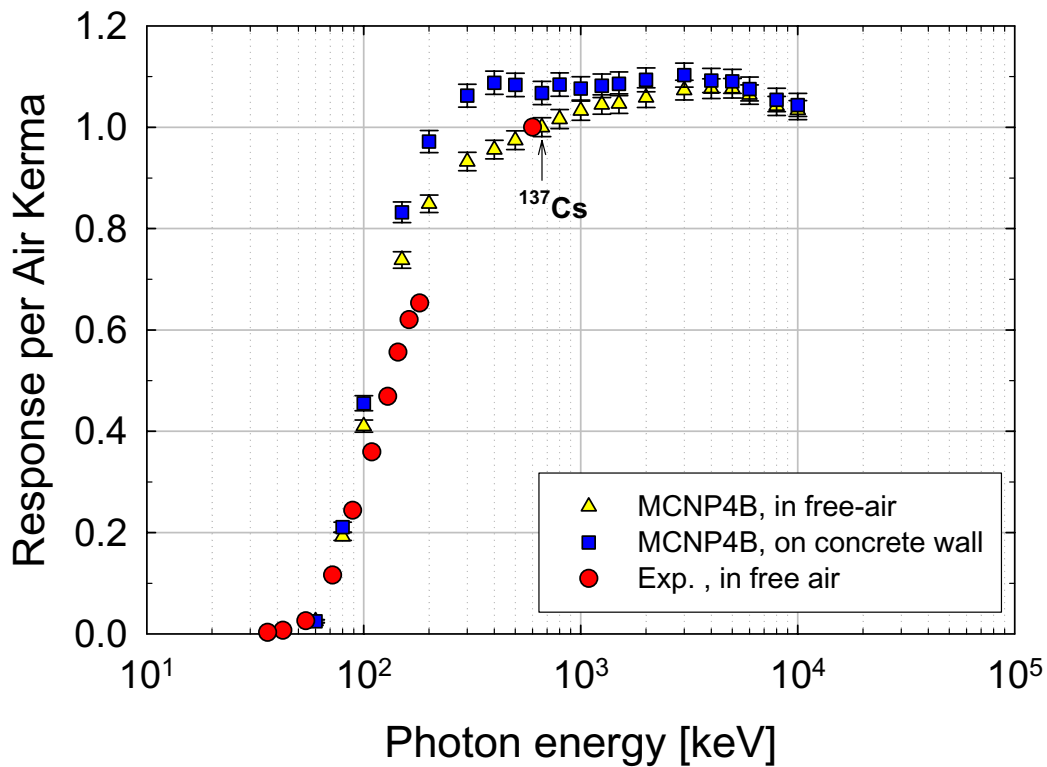


図 10 RD-120 の γ 線に対するエネルギー特性 (コンクリート壁上, 0° 入射条件)

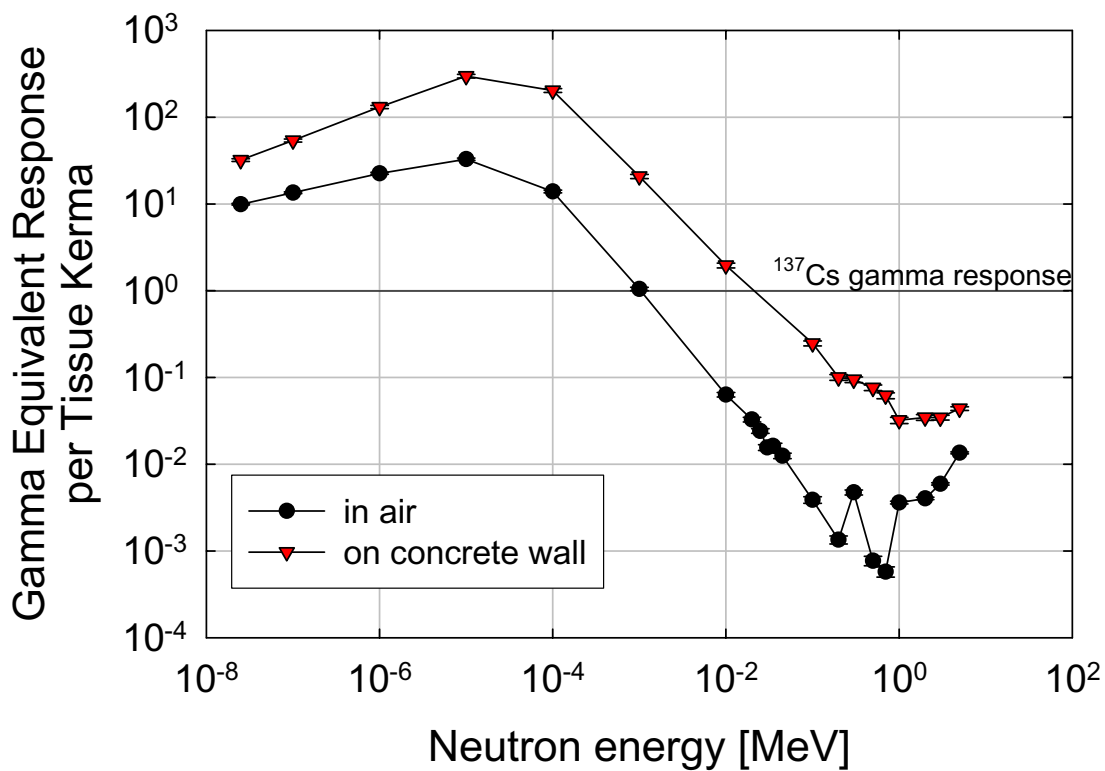


図 11 RD-120 の中性子に対するエネルギー特性 (コンクリート壁上, 0° 入射条件)

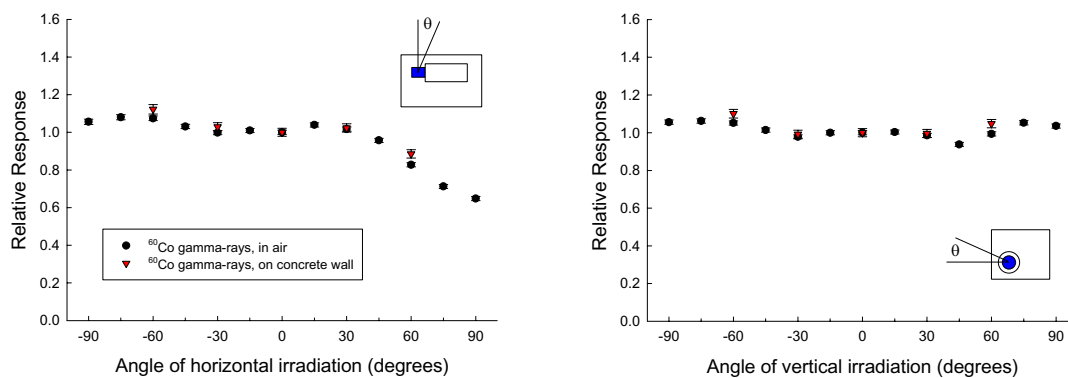


図 12 RD-120 の ^{60}Co γ 線に対する方向特性
(自由空間中とコンクリート壁上の比較)

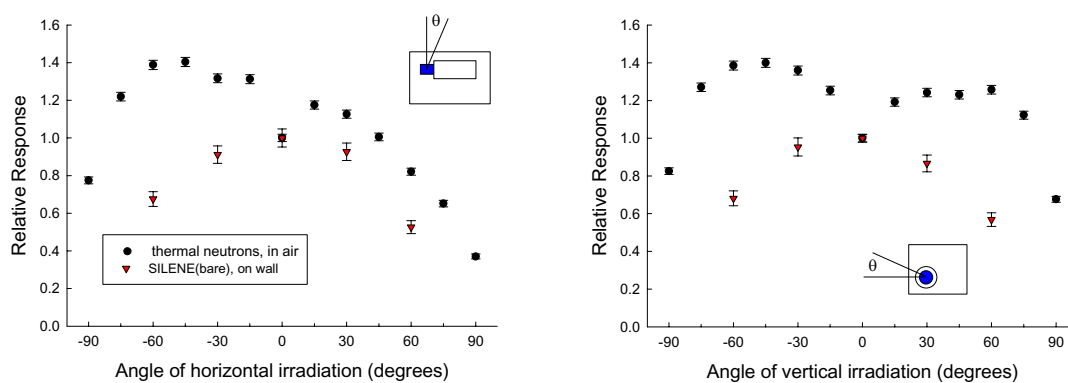
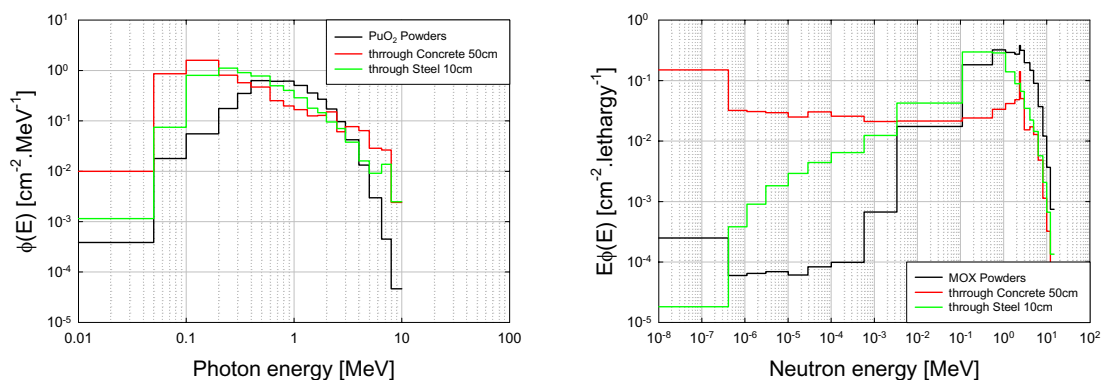
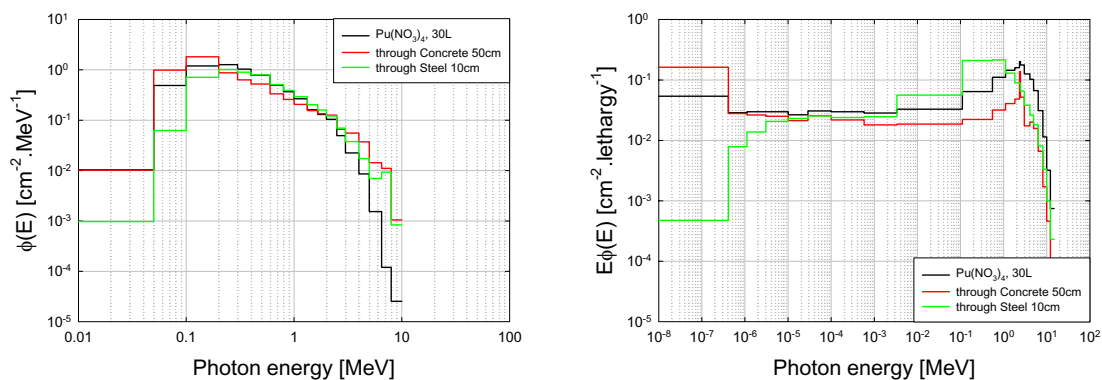


図 13 RD-120 の中性子に対する方向特性
(自由空間中とコンクリート壁上の比較)



(1) PuO₂ powders



(2) Pu(NO₃)₄ 30L

図 14 2 種類の臨界条件 (PuO₂粉末, 硝酸 Pu 溶液 30L) における
 γ 線と中性子のスペクトル
 (図ではフルエンスを 1cm² に規格化している)