

シンチレーションファイバを用いた放射線方向検出器の開発

佐川 宏幸*, 占部 逸正*

Development of a Scintillation Fiber Detector for Determination of Directional Distribution of Radiations

Hiroyuki SAGAWA* and Itsumasa URABE*

ABSTRACT

The purposes of the radiation measurements are the determination of kinds of radiation, intensity of energy, and direction of incident radiations. It is important for radiation protection to know the information on the positions and directions of incident radiations. From this point of view, a circular scintillation fiber detector composed using position sensitive scintillation fiber sensor was constructed for determination of the directional distribution of radiations incident on a certain point of interest. The response function to get the information on incident direction of radiations was obtained by the experiments and was compared with the results by the Monte Carlo calculation method. The fundamental characteristics of the circular detector were investigated by the irradiation experiments using Cs-137 and it was found that the directional information of radiations fields which have two dimensional distributions could be obtained by the present method.

Keywords : scintillation fiber, directional distribution, radiation protection, response function

1. 緒言

情報通信分野の革新的な要素技術の1つである光ファイバーは、1960年代から1970年代にかけて、伝送損失の改善が進み、現在の信号伝送手段の主流となりつつある。計測の分野では、1980年代初めに測定対象について光の形で得られる情報を光ファイバーを使って伝送する光ファイバーセンシングの考え方が生まれている。¹⁾ この光ファイバーセンシングは、センサー部で得られる光の情報を光ファイバーを用いて伝送する方法と、温度、圧力、速度などに対して光ファイバ自体が持つ感受性やファイバー材中に適当な元素をドープすることで得られる光学的特性を利用し、センサーと信号伝送路の役割を兼用する方法がある。¹⁾ 後者の方法として、光ファイバのコア部を、プラスチック系、

ガラス系、または有機液体系シンチレーター材で置換したシンチレーションファイバーがある。これは入射放射線によって局所的に発生したシンチレーション光を空間的な情報を損なわずに遠方まで伝送することができるため、シンチレーターと光ファイバーの両方の長所を兼ね備えた放射線イメージセンサー用新素材として近年多くの応用が期待されている。¹⁾

放射線を測定する場合、その種類、エネルギーの強さ、数、位置、方向などが測定対象となる。光ファイバをセンサとして用いればその光伝播特性を利用して特に位置、方向の測定が可能になる。放射線から人体を防護する場合に、放射線がどの位置へどの方向から入射するのかという情報は大変

*電子・電気工学科

重要である。本研究では最初に位置検出器を作成し、放射線位置情報が得られることを確認した。また、試作した位置検出器の基礎特性として放射線の波高分布の半値幅を検討した。次に方向検出器を作成し、 ^{137}Cs を用いて方向検出器の吸収確率を求め、この吸収確率と平行ビーム放射線による波高分布を用いて、放射線方向情報を求める際に必要な応答関数を作成した。また、EGS4モンテカルロシミュレーションコードを用いて方向検出器の応答関数を作成し、実験結果との比較検討を行った。

この検出器の適用例として、京都大学原子炉実験所の中性子ビーム孔からの中性子をニッケル、鉄のサンプルに照射し、この時に発生する中性子捕獲 γ 線の観測を行った。得られた波高分布のデ

ータから応答関数を用いて逐次近似法により方向情報を求め、本検出器の有効性を検討した。

2. 位置および方向の決定法

位置検出法の原理を図1に示す。図に示すように放射線照射によってシンチレーションファイバ内部で発生した光子が一方の光電子増倍管に届くまでに要する時間と、もう一方の光電子増倍管に届くまでに要する時間には差が生じる。ファイバ中を進む光子の速度はほぼ一定と考えられるので2つの光電子増倍管で光を検出するときの時間差は光子発生位置に依存する。この時間差を用いて光子発生位置を測定する方法は飛行時間法として知られている。¹⁾²⁾³⁾

方向検出器の原理を図2に示す。方向検出器で

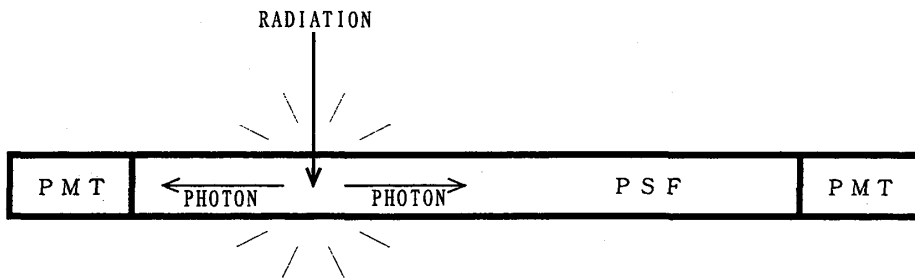


Fig.1 An idea of the position detection of incident radiations. PMT: photo-multiplier tube, PSF: plastic scintillation fiber

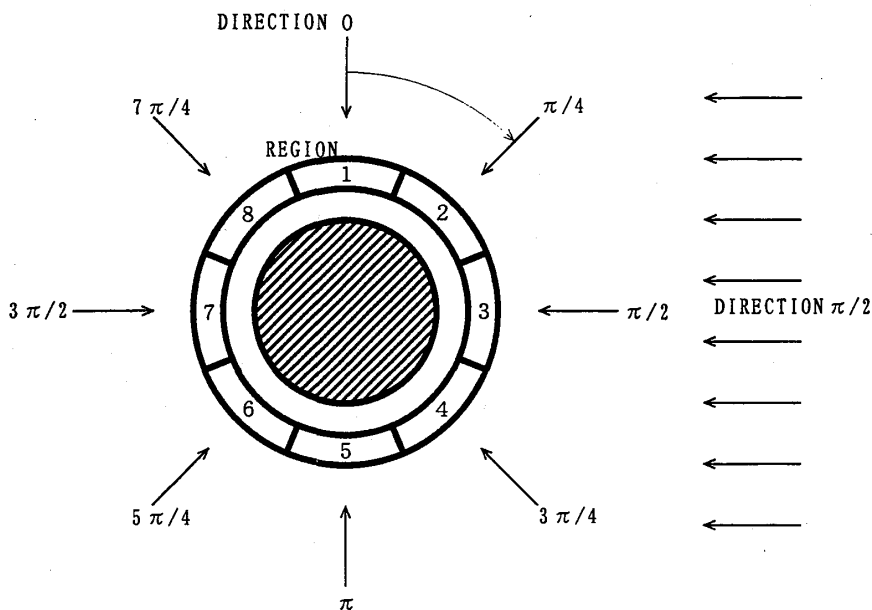


Fig.2 Diffusion of the direction of incident radiations and the region of the circular detector.

はシンチレーションファイバを環状にし、環状ファイバの内側に放射線シールドを置く形状とした。任意の方向から水平に平行ビーム放射線が照射する場合、その放射線は放射線シールドで遮られた部分にはほとんど照射されないのでファイバへの吸収確率が小さいが、入射面には全部が照射されるのでファイバへの吸収確率が大きい。放射線による光子の発生位置は位置決定の理論から得られる。このようにして得られた波高分布は、平行ビーム放射線の方向情報を直接あらわしていないため、放射線照射情報である波高分布から放射線方向情報を得るための応答関数を作成し、これを使用して方向情報を決定した。応答関数を作成するに当たって、図 2 に示すように検出器を $(\pi/4)$ ごとに区切り領域 1 から 8 までを決めた。それぞれの領域に対応して、方向 0 から $(7\pi/4)$ までを決めた。それぞれの領域内でのカウント数から方向情報を得る応答関数を作成した。方向 θ からの放射線強度を $D(\theta)$ 、方向 θ からの放射線を領域 n で吸収する確率を $R(\theta, n)$ 、領域 n でのカウント数を $C(n)$ とすると、 D 、 R 、 C には次の式のような関係がある。

$$C(n) = \int R(\theta, n) D(\theta) d\theta \quad (1)$$

この式を行列表示すると $C=RD$ となり、方向情報 D は $D=R^{-1}C$ で求められる。ここでは、得られるスペクトルの精度を近似的に高めていく逐次近似法で D を求めた。

3. 実験

3. 1 実験装置

3. 1. 1 方向検出器

検出器の概念図を図 3 に示す。検出器は、直径 0.5 mm 長さ 65 cm のプラスチックシンチレーションファイバ SCSF-38(KURARAY) を 91 本束ねて直径約 5 mm のバンドルファイバにした後、これを外径 17 cm ~ 18 cm の円環状にまるめた形にした。方向情報を明確にするために、この円環の中央に直径 14 cm 高さ 3 cm の鉄をシールドとして置いた。ファイバの両端に光電子増倍管を接続しやすくするために、ファイババンドルの両端は約 12 cm 重なり合う形状にした。

3. 1. 2 測定システム

方向検出器の測定系を図 4 に示す。位置検出器・方向検出器のセンサであるシンチレーションフ

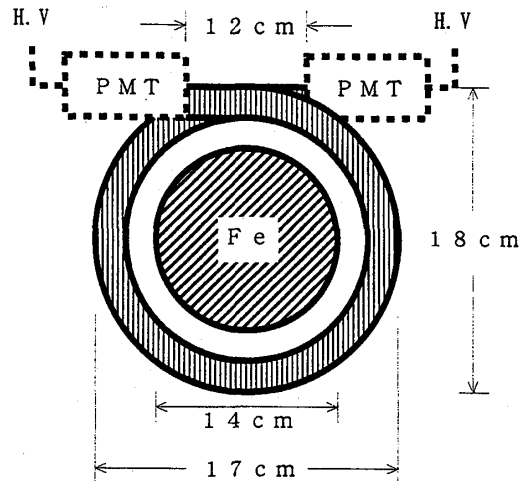


Fig.3 Diagram of the circular scintillation fiber detector used for the determination of radiation directions.

ファイバの両端に光電子増倍管 R1635(浜松ホトニクス社)を接続し、その出力をファーストプリアンプ VT-120(EG&G ORTEC)で増幅した。光電子増倍管には信号対雑音比を上げるために-1250V の H.V 電圧を加え、ファーストプリアンプには+12V の電圧を加えた。ファーストプリアンプで増幅した信号は一方のみ遅延回路 425A(EG&G ORTEC)を通し、遅延回路を通さない方の信号を start 信号、遅延回路を通した方の信号を stop 信号として時間波高変換器 467(EG&G ORTEC)に入力した。時間波高変換器で start 信号と stop 信号の時間差を波高変換した出力信号は A-D 変換器 2201A(LABORATORY)を通した後、波高分析器 LN-6400(LABORATORY)に記録し、その波高分布をパーソナルコンピュータ PC-9801(NEC)で観測した。

3. 1. 3 方向検出器の基礎特性

(1) 位置検出器の半値幅

半値幅の測定の実験条件を図 5 に示す。線源に ^{226}Ra を使い、照射位置を限定するために鉛(10cm × 10cm × 5cm)を使って 5 mm 幅にコリメートして位置検出器の半値幅を測定した。位置検出器のファイバは直径 2mm のものを使用した。コリメートの際、シンチレーションファイバを破損しないように高さ 1.2 cm の台をシンチレーションファイバに沿って両側に置き、その上に鉛を置いた。従って ^{226}Ra により照射されているファイバの断面積は $2 \times 5 \text{ mm}^2$ である。1 回の測定時間を 10^4 秒とし、測定位置は DEL AY 側のファイバの端から 30 cm、50 cm、70 cm、

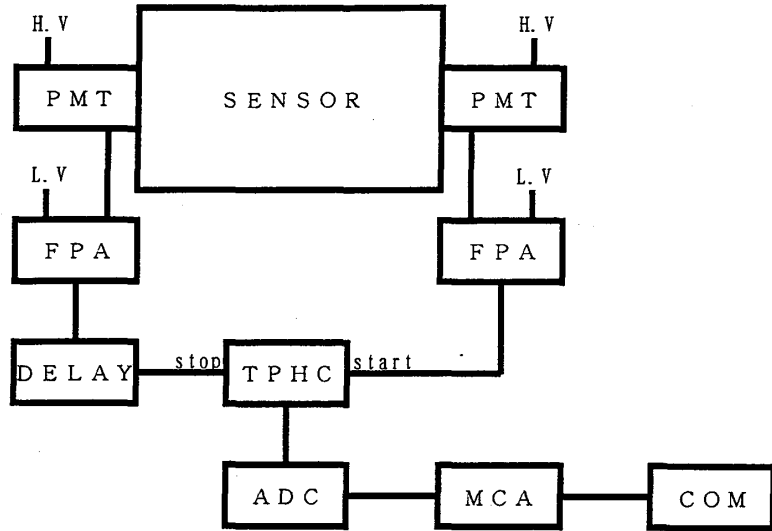


Fig.4 Block diagram of the measuring system. SENSOR: fiber detector, PMT: photo-multiplier tube, FPA: fast pre-amplifier, DELAY: first delay line to pulse height analyzer, TPHC: time to pulse-height converter, ADC: analogue-digital converter, MCA: multi-channel analyzer, COM: personal computer

100 cm、130 cm、150 cm、170 cmの7個所とした。

(2) 線源間距離依存性

方向検出器の動作の確認を行うため、点状線源として¹³⁷Csを用い測定を行った。図2の方向(3π/2)の位置で検出器の端と線源との距離を10cmにして10⁴秒の測定を行った。線源を置いたときの測定値からバックグラウンドの測定値を引くことにより、

¹³⁷Csのみによる測定結果を求めた。測定は検出器の動作を調べるために、検出器の端と線源間の距離を20 cm、30 cm、50 cm、70 cmと変えて行った。

(3) 方向検出器の応答関数の作成

方向検出器の応答関数を作成するために方向検出器の吸収確率の測定を行った。照射は図6

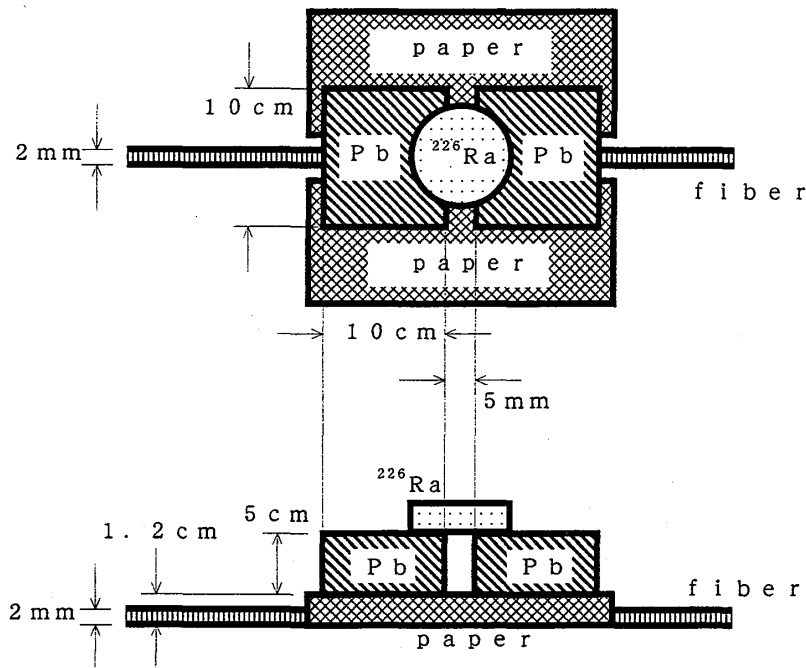


Fig.5 Experimental arrangement used for measurements of the resolution of the position sensitive detector.

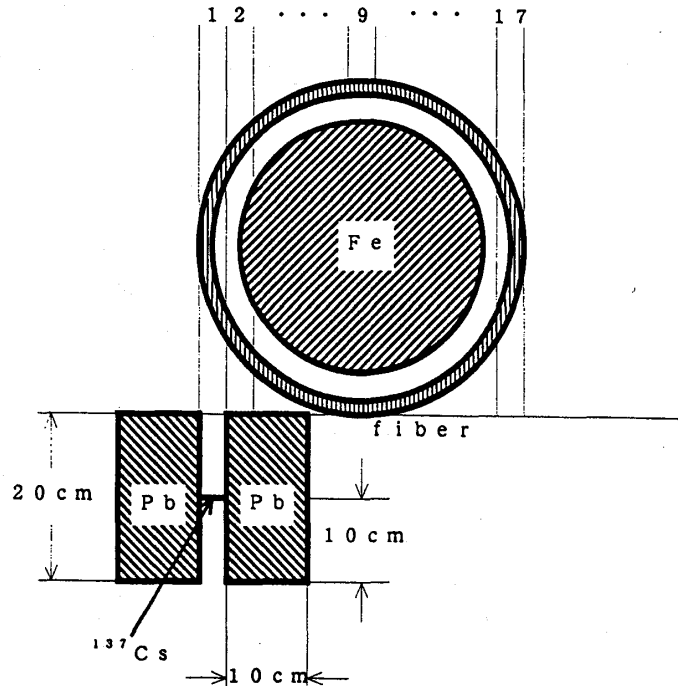


Fig.6 Experimental arrangement used for measurement of detection efficiency of the circular scintillation fiber detector.

に示すように ^{137}Cs を用いて検出器の端から 1 cm ほどの幅に鉛(20 cm×10 cm×5 cm)でコリメートして行った。線源は鉛の端面より距離 10 cm の位置に置いた。測定は検出器の接線に沿って鉛と線源を中央に向かって 1 cm ずつ移動させながら測定を行った。線源の強度 $3.5 \times 10^6 \text{Bq}$ (1985 年 12 月 1 日) でそれぞれ 10^3 秒測定し、次に $3.7 \times 10^5 \text{Bq}$ (1985 年 12 月 1 日) のものでそれぞれ 10^4 秒測定した。それぞれの方向についてこの測定を行い、8 方向からの平行ビーム放射線に対する応答関数の作成を行った。

3. 1. 4 KUR 実験室における測定

京都大学原子炉実験所の中性子実験室で作業環境場の放射線強度分布の偏りを知るために試作した方向検出器を使用した。図7に実験室内の装置の配置を示す。実験室の壁に中性子ビーム孔があり中性子発生装置からの中性子が放出される。ビーム孔の近くに中性子をコリメートするための LiF のスリットがある。スリットの孔の大きさは 1.4 cm × 1.6 cm であった。中性子を照射するサンプルは鉄あるいはニッケル(5 cm × 5 cm)で、中性子と同じ高さで床より 115 cm 壁から 95 cm の位置にスタンドで固定した。この実験室内で、方向検出器の設置位置・方向を変え測定を行った。3通りの場合を

以下に示す。

設置状態 1: 図7に示すように方向検出器を中性子ビームの通過する方向と同一直線上にある高さ 95.3 cm の台の上にサンプルから 166 cm 離して置いた。検出器の向きはサンプルのある方向にセンサの領域 7 の部分を向け、センサのファイバから反時計周りに出力される信号を DELAY 側で検出するようにした。サンプルと検出器の間の LiF (厚さ 5 mm) は、サンプルを通過した中性子が後方の金属類に照射し捕獲 γ 線を発生することを防ぐために設置した。サンプルとして厚さ 1 mm のニッケルを用い 3×10^3 秒の測定を行った。

設置状態 2: 測定条件は状態 1 と同一でニッケルの厚さを 10 mm にして発生する γ 線の数を増した条件下で 2×10^3 秒の測定を行った。

設置状態 3: 図8に示すように検出器は中性子ビーム孔から右に 34 cm、中性子ビーム孔の壁から 74 cm の場所に、高さ 66.5 cm のダンボール箱の上に置いた。検出器の向きは中性子ビーム孔の壁側にセンサ領域 1 の部分を向け、センサのファイバから反時計周りに出力される信号を DELAY 側で検出する状態に設置した。サンプルとしては厚さ 10 mm の鉄を置き、ニッケルとの相違を見るために状態 2 と同一の 2×10^3 秒の測定を行った。

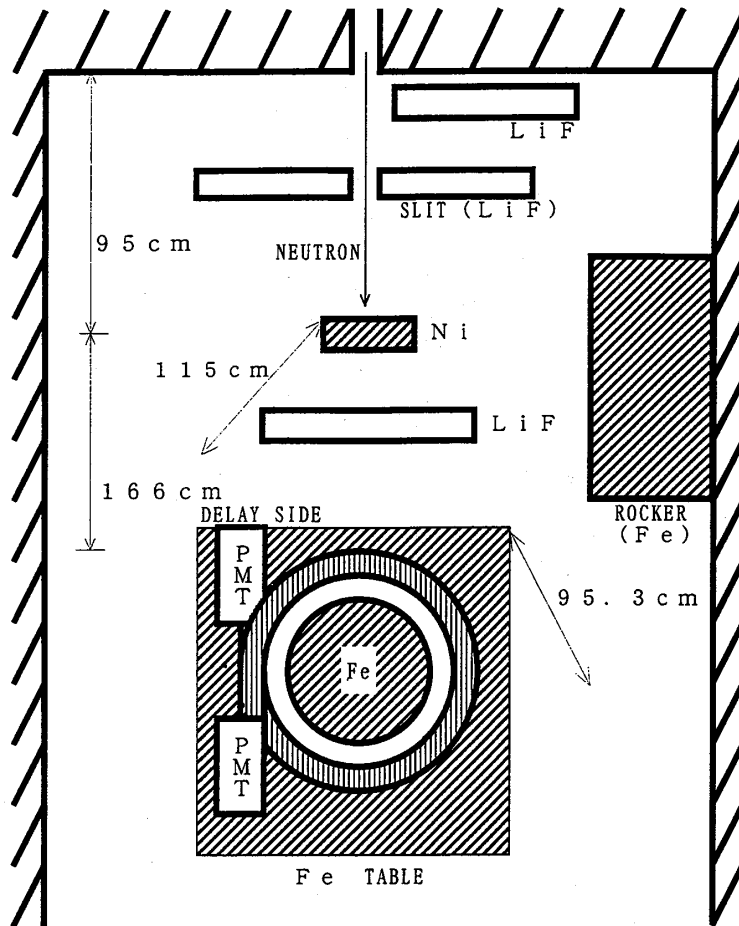


Fig.7 Experimental arrangement used for directional distribution of radiations in the experimental room at the KUR. The detector was placed at the center of the room.

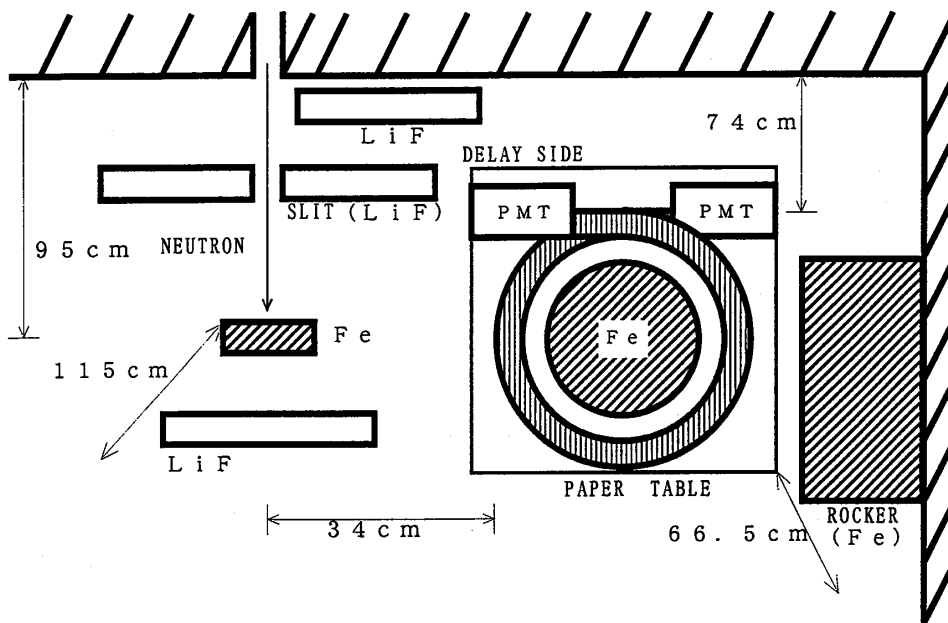


Fig.8 Experimental arrangement used for directional distribution of radiations in the experimental room at the KUR. The detector was placed at the right side corner of the room.

4. 応答関数のモンテカルロ計算

応答関数を検討するために測定で得た方向検出器の吸収確率と EGS4 モンテカルロ法による吸収確率の比較を行った。EGS4 の計算に使用した放射線方向検出器のモデルを図9に示す。図の上方は概観図を示し、下方は概観図を中央で切断した場合の断面図を示す。下図の円筒断面図で斜線の部分は遮蔽体を表わし、縦線の部分がシンチレータを表わしている。図に示すように検出器は外径を 17 cm、内径を 16.2 cm とし、厚さ 0.4 cm とした。鉄の遮蔽体は直径 14 cm 厚さ 3 cm の円筒形とし、検出器の中央に設定した。計算に必要な領域としては検出器の上の空間を領域 1 とし、円筒内部の上の段について、一番内側を領域 2、中央を領域 3、外側を領域 4 とした。また下の段の一番内側を領域 5、中央を領域 6、外側を領域 7 とした。また検出器の下の空間を領域 8 とし、検出器の側面外側の空間を領域 9 とした。物質としては円筒外の領域 1、8、9 は GAP(真空)とし、領域2および領域 5 を鉄、領域 7 をポリスチレン(センサ)、残りを

GAPとして、それぞれ割り当てた。

計算の手順は、まずポリスチレン・鉄などの断面積データを読み込む。領域を分割し、分割した領域のサイズを設定する。設定した領域に読み込む物質データを割り当てる。計算回数、照射する γ 線のエネルギーの強さ・照射位置・照射方向などを決める。放射線照射により発生する電子の吸収エネルギーを求め、結果を出力し処理を終了する。

計算条件は実験条件と同様に、端から 1cm ごとに照射位置 1 から 9 までを決め、662keV のエネルギーの γ 線を水平方向に照射した時の吸収確率を、それぞれ計算した。8 等分したセンサ部での吸収確率の計算を行った。

5. 結果および考察

5.1 位置検出器の基礎特性

DELAY側から 100 cm の位置に ^{226}Ra を置き測定を行った場合と、170 cm の位置に置き測定を行った場合の波高分布を図 10 に示す。横軸はチャンネル数を示し、縦軸は計数値を示す。実線は放

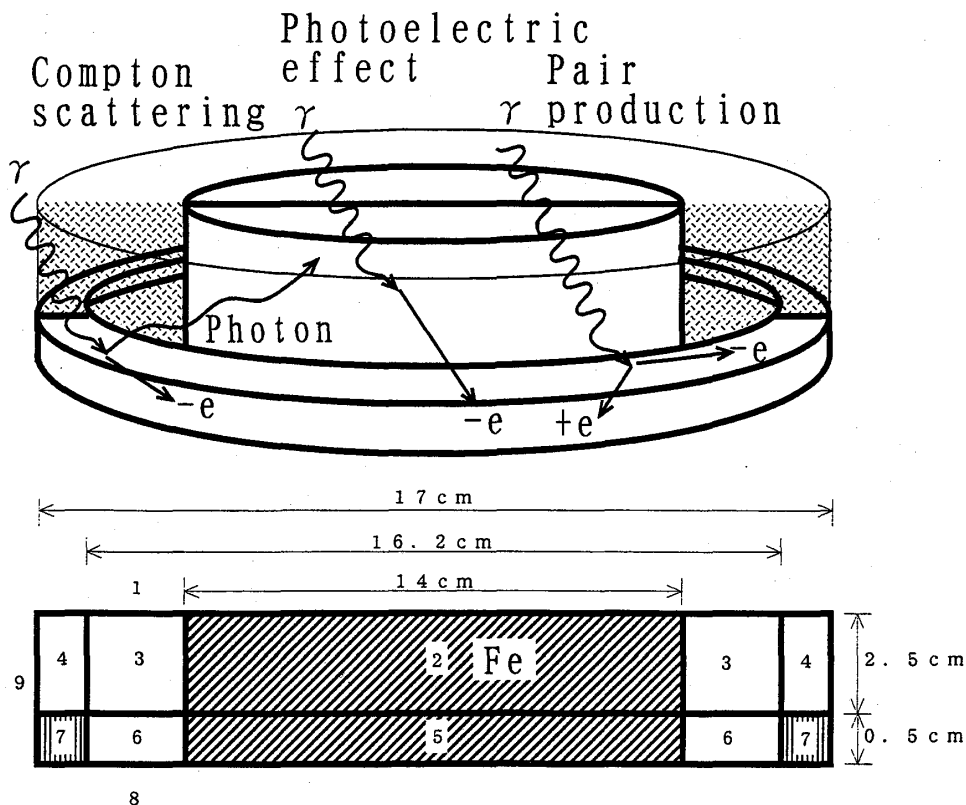


Fig.9 A model used for calculation of the detection efficiency of the circular fiber detector and material numbers allocated to the regions of the sensor. 1,3,4,6,8,9:GAP, 2,5:Fe, 7:POLYSTYRENE(SENSOR)

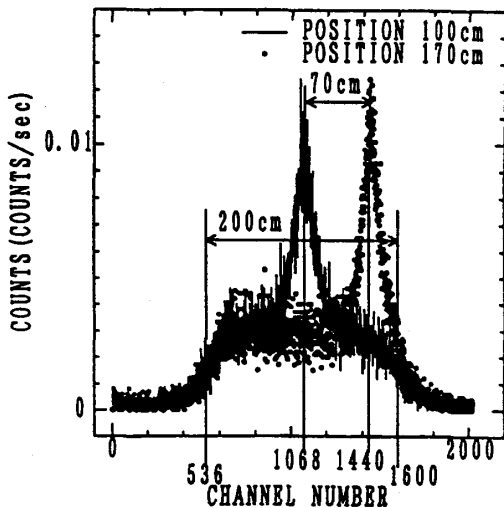


Fig. 10 Variation of pulse-height distribution cause by different position of irradiation.

射線照射位置 100 cmのときの波高分布を示し、点線は放射線照射位置 170 cmのときの波高分布を示す。放射線照射位置 100 cmのときのピークチャンネルは 1068ch であり、放射線照射位置 170 cmのときのピークチャンネルは 1440ch であることから 1ch あたりの長さは 1.88 mmである。したがって検出器の長さ 2 mは 536ch から 1600ch の範囲に相当することがわかる。測定した波高分布は ^{226}Ra の照射によるピークの部分以外にも波高分布が見られるが、これは自然界中に存在する γ 線などによるものである。位置検出器の分解能として半値幅を考え、半値幅の放射線照射位置による変化を図 11 に示す。図より半値幅は約 18 cmであり、場所によらずほぼ一定であることが明らかとなった。

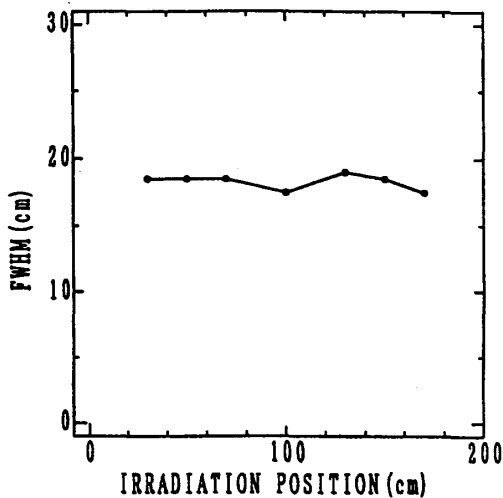


Fig. 11 FWHM as a function of irradiation position.

5. 2 方向検出器の応答関数

図 2 の方向 π から ^{137}Cs による放射線が入射したときの領域ごとの吸収確率の分布を図 12 に示す。横軸は領域を示し、縦軸はそれぞれの領域での吸収確率を示す。実線は EGS4 による計算結果、破線は実験による測定結果である。実験値の方が EGS4 の場合より領域 4,5,6 で少し高い値となっているが、全体としてほぼ同じ吸収確率となっている。検出器の中央付近の相違は実験値と計算値の照射条件の相違に起因すると考えられるため、今回は実験による吸収確率を応答関数として使用した。

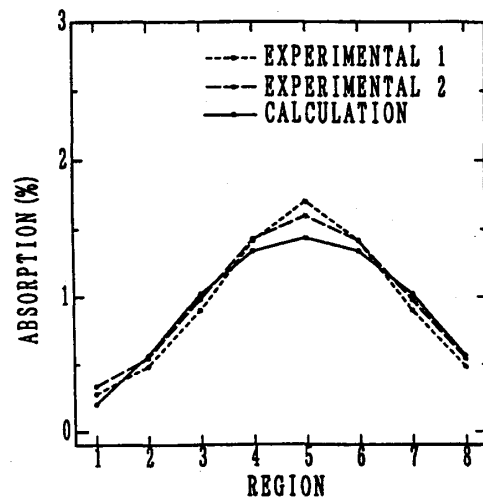


Fig. 12 Response functions of the circular scintillation fiber detector.

5. 3 方向検出器の基礎特性

点状線源による測定の一例として図 2 の方向 ($3\pi/2$) に距離 10 cm 離して ^{137}Cs を置いたときの測定結果を図 13(a) に示す。この結果はバックグラウンドを引いているので ^{137}Cs のみによる結果である。横軸はセンサの領域を示し、縦軸はそれぞれの領域内での計数値を示す。方向 ($3\pi/2$) からの放射線により領域 6, 7, 8 でのカウント数が多くなっている。このカウント数の分布から応答関数により方向情報を計算した。計算結果を図 13(b) に示す。横軸は方向情報を示し、縦軸はそれぞれの方向からの放射線強度を示している。図より方向 ($3\pi/2$) から約 $90 (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ の強度の放射線、方向 π から約 $5 (\text{photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1})$ の強度の放射線が照射されており、他の方向からは相対的にほとんど放射線が観測されていないことが分かる。線源は方向 ($3\pi/2$) に置き方向 π には線源を置か

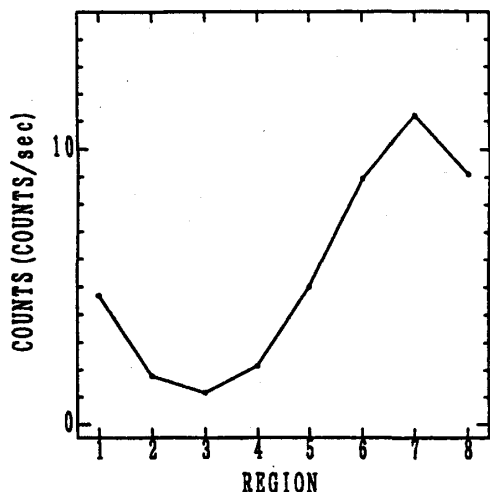


Fig. 13(a) Pulse-height distribution by the circular scintillation fiber detector.

なかったため、方向 π に見られる方向情報は放射線の後方散乱によるものと考えられる。方向 $(3\pi/2)$ からの放射線強度が最も高く、方向 π からの放射線強度の約 14 倍の強度を持つので、おおむね正しい方向情報が得られたと考えられる。

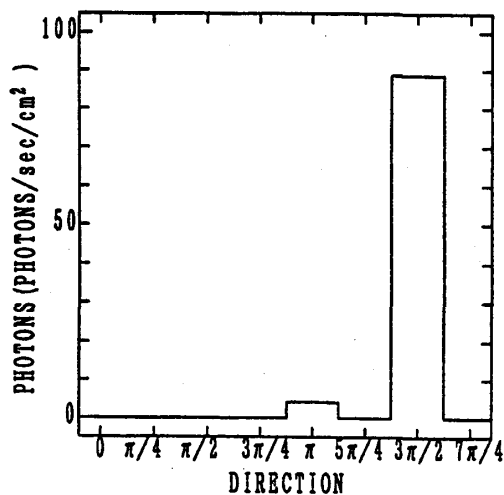


Fig. 13(b) Directional distribution of gamma-rays from Cs-137.

線源と検出器の間の距離を変化した場合に、方向検出器によって得られた計数値の変化を図 14 に示す。横軸は線源と検出器の間の距離を示し、縦軸はその距離における測定によって得られた計数値を示す。図より得られる計数値は距離が長くなるにつれ減少することが分かる。図には距離の逆二乗則を仮定した場合の変化を破線で示している。

得られた結果と逆二乗則の直線を比較すると、実験では距離の減少の割に計数値の減少が少ない事が分かる。これは距離が増加したことで散乱による放射線が相対的に大きく寄与するためと考えられる。

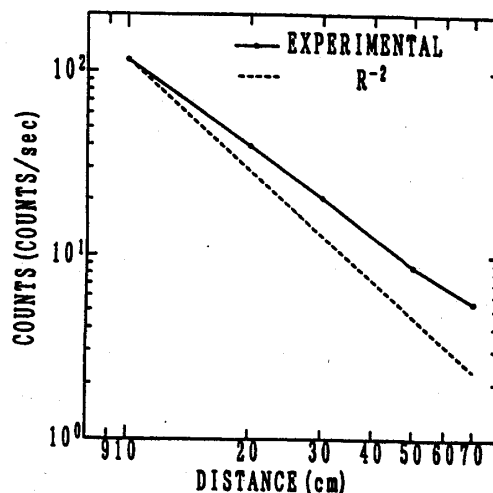


Fig. 14 Dependence of counting rates on distance from the source to the detector.

5. 4 KUR 実験室の放射線方向分布

KUR 実験室での設置場所 1 の条件での波高分布を図 15 に示す。ニッケルの厚さは 1 mm である。

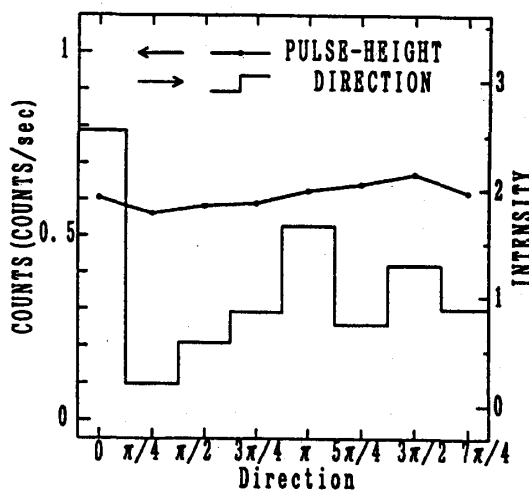


Fig. 15 A pulse-height distribution by the circular scintillation fiber detector and directional distribution of gamma-rays in the experimental room at the KUR. The detector was placed at the center of the room. The thickness of nickel sample is 1mm.

検出器の設置状態からサンプルに面した方向($3\pi/2$)からの放射線が最も多いと予想されたが、図の折れ線で示した波高分布より($3\pi/2$)方向からの計数値が最も多くなっているのが分かる。図には応答関数を用いた方向情報もヒストグラムで示した。方向情報では方向 0 からの放射線が最も多く、($3\pi/2$)方向からの約 2 倍の量となっている。設置例 2 として得られたニッケルの厚さ 10 mm の場合の波高分布を図 16 に示す。計数値は 1 mm の場合より大きい。図の折れ線で示した波高分布より($7\pi/4$)の計数値が($3\pi/2$)の計数値よりわずかに大きく最大値となっている。方向情報はヒストグラムで示すが($7\pi/4$)で最も大きく、0、 π 方向でも大きな値が得られている。他方、($\pi/4$)方向、($\pi/2$)方向からのバックグラウンド放射線の方向情報はほとんど観測されない結果となっている。図 17 は設置場所 3 での測定結果を示す。サンプルの鉄に面した方向($3\pi/2$)で最も大きな計数値が得られている。求めた方向情報は、バックグラウンド放射線情報がすべての方向に表れ、($3\pi/2$)に大きな強度情報が表れている。方向 0 に大きな強度情報がある以外は適当な方向情報が得られたと考えられる。

以上の 3 例の結果をまとめると、放射線の入射方向情報にあいまいさを伴う場合も少なくないが、

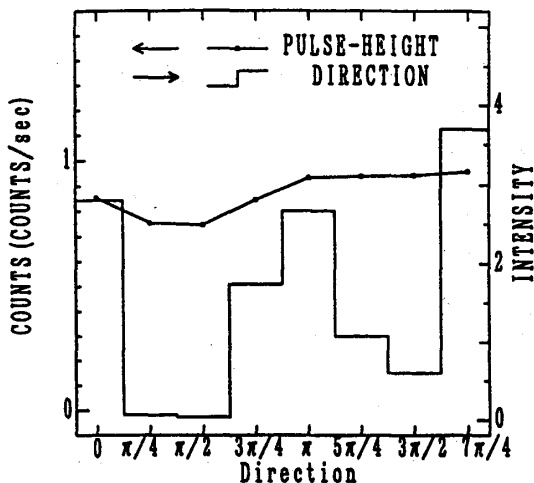


Fig. 16 A pulse-height distribution by the circular scintillation fiber detector and directional distribution of gamma-rays in the experimental room at the KUR. The detector was placed at the center of the room. The thickness of nickel sample is 10mm.

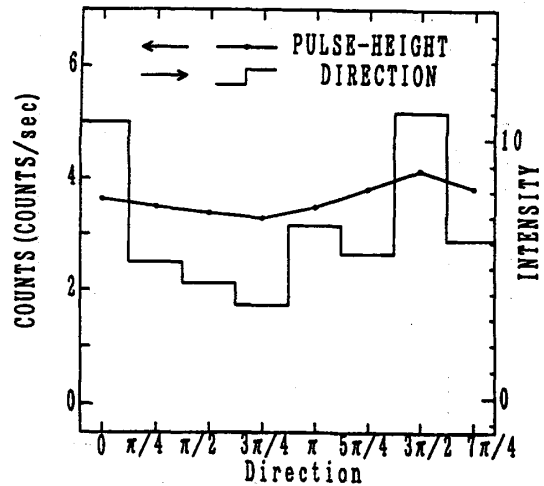


Fig. 17 A pulse-height distribution by the circular scintillation fiber detector and directional distribution of gamma-rays in the experimental room at the KUR. The detector was placed at the right side corner of the room. The thickness of iron sample is 10mm.

これは、

1. 中性子捕獲 γ 線を利用していることで場が複雑になっていること。
 2. 試作した方向検出器は平面的な情報には対応可能であるが、3 次元的な情報を得るには限界があること。
 3. 応答関数が複雑な検出器の形状を反映したものになっていないこと。
- などが原因として考えられる。今後、検出器や応答関数を改良する必要があると考えられるが、最初の 2 例の場合、測定の数値が少ないために統計上の理由で求めた方向情報に問題が生じたとも考えられる。

5. 結言

以上の検討の結果以下の結論が得られた

1. 円形のシンチレーションファイバー検出器を使用する事により、2 次元平面内に近いところの測定で 1 方向からの放射線に対し正しい方向情報が得られた。
2. 放射線強度の増加と共に計数値が増加したことから、吸収確率に基づき方向情報と共に強度情報の得られる可能性が明らかとなった。
3. 3 次元的な放射線環境場では、得られた方向

情報に多くの誤差を伴う場合があり、上下方向からの放射線を遮断する形状にするなど検出器を改良する必要がある。

4. 逐次近似法による解析方法の改良を行うと共にさまざまな種類のエネルギーに対応できる応答関数を作成する。

参考文献

- 1) 井口哲夫(東京大学・工学部) シンチレーションファイバー 応用物理 第 63 巻 第 6 号 (1994)
- 2) 江本武彦、鳥居建男、野崎達夫、安藤秀樹(動燃) シンチレーション光ファイバーによる放射線空間分布測定 放射線 Vol.21, No.3 (1995)
- 3) 森千鶴夫(名古屋大学) 中沢正治(東京大学) 放射線計測における光ファイバーの利用 日本原子力学会誌 Vol.38, No.1 (1996)