光ファイババンドルを利用するシンチレーション測定系の γ 線検出特性

正員 新田 陽 一 (豊橋技科大)

正員 東山 禎 夫 (豊橋技科大)

正員 榎本 茂 正 (豊橋技科大)

1. ま え が き

代表的な放射線検出器の一つであるシンチレーション検出器は、通常シンチレータと光電子増倍管を一体化してプローブを形成している。このため高温、強磁界など条件の悪い環境においては光電子増倍管が正常に動作せず、測定に支障を生ずることも多い。また、プローブと計数部との距離を十分とって測定を行う場合、光電子増倍管への高圧電源線およびそれからの信号線が長くなるため、周囲の電磁場による誘導雑音に対する処置が必要となる。

これらの問題は、シンチレーションを光電子増倍管まで伝送する何らかの媒体を設けてシンチレータと光電子増倍管を分離し、後者を計数部に近接、かつ安定動作が可能な場所に設置することで解決できる。シンチレーションの伝送媒体として入手が容易な光ファイバが挙げられ⁽¹⁾、核融合炉環境における α 線、中性子計測の試み⁽²⁾や、連続製造用の電磁かくはん炉における γ 線レベル計での実用例⁽³⁾が報告されている。この際、プローブを小形、軽量化することによりパイプ中、あるいは液中への挿入、遠隔測定など特殊な応用も期待される。

本論文では、各種のシンチレータと光ファイババンドルを組合せた検出部の γ 線シンチレーション集光率をモンテカルロ法によって計算すると共に、これに光電子増倍管を加えた幾つかの測定系で γ 線スペクトル

を観測し、上述の応用の基礎となる γ 線検出特性について検討した。

2. モンテカルロシミュレーション

〈2.1〉 計算方法 シンチレータ内で発生したシンチレーションが光ファイババンドルに集められる割合は、シンチレータの形状、材質などによって変化する。これを検討するため、シンチレータ内で発生したシンチレーションがその出射面から出射する割合（出射率）と、シンチレータ・光ファイバ測定系においてシンチレーションが光ファイババンドルに入射、伝送される割合（集光率）をモンテカルロ法で計算した。

シンチレータは円柱状で光の出射面を除いて MgO 反射材で覆われており、出射面には光電子増倍管、あるいは光ファイババンドルが密着されるものとして、以下の過程に従って計算を行った。計算に使用した物理定数の値を表1に示した。

(1) シンチレータを図1に示すように64個の同体積のブロックに分割し、そこで発生したシンチレーションの発光点は各ブロックの重心とする。

(2) 各発光点における発生光子数は等しく100個とし、総数6,400個の光子について計算を行う。光子

表1 シミュレーションに用いた物理定数

Table 1. The physical parameters used in the simulation.

屈折率	NaI(Tl) シンチレータ	1.850
	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO) シンチレータ	2.150
	MgO 反射材	1.736
	PMT 入射窓	1.500
	光ファイバ: コア	1.495
	光ファイバ: クラッド	1.402
シンチレータの光減衰長 ⁽⁴⁾		2,000 mm
反射率 ⁽⁵⁾	NaI(Tl)-MgO	0.97
	BGO-MgO	0.98

The Gamma-Ray Detection Characteristics of a Scintillation Counting System Using Optical Fiber Bundle. By Youichi Nitta, Member, Yoshio Higashiyama, Member & Shigemasa Enomoto, Member (Department of Electrical and Electronic Engineering, Toyohashi University of Technology).

新田陽一: 正員, 豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学系

東山禎夫: 正員, 豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学系

[現在, 山形大学工学部電気工学科]

榎本茂正: 正員, 豊橋技術科学大学工学部電気・電子工学系

図 1 シンチレータの分割とシンチレーション発生点

Fig. 1. Schematization of division of scintillator and scintillation point.

は 4π 方向へランダムに放出される。

(3) 光子数の減衰は反射損失および吸収損失により生じる。

(4) シンチレータ境界面における光子の挙動は Lambert の法則⁽⁶⁾および Fresnel の法則⁽⁷⁾に従う。

(5) 1 個の光子に対する計算は、シンチレータより出射した場合、あるいは反射回数が 100 回を超えたとき打切る。

〈2・2〉 光子の出射率と出射面位置・角度分布

最初にシンチレータの形状、材質による光子の出射率の変化ならびに出射面における光子の位置・角度分

布を求めた。出射面に対向、密着する媒質には光電子増倍管入射窓を考え、その屈折率を 1.50 とした。

図 2 (a)～(d)に、各種のシンチレータの出射面における光子の位置・角度分布および光子の出射率の計算結果を示す。位置分布は出射面を約 320 の同一面積に区切り、各要素における出射率を求めたものである。角度分布は光子の出射角を調べて統計をとり、各階級値の単位立体角で規格化した。階級の幅は 1° 、範囲は $0\sim 90^\circ$ とし、 $90\sim 180^\circ$ の分布は $0\sim 90^\circ$ の分布を複写した。

図 2 の光子の総出射率を比較すると、シンチレータの直径と長さの比が大きいのほど高い。これは各発光点から出射面を見た立体角が大きく、少ない反射回数で出射すると共に、出射するまでの通過距離が短くなることによる。また同じ形状、大きさの場合、(a) NaI(Tl) と (d) BGO ($\text{Bi}_2\text{Ge}_4\text{O}_{12}$) の両シンチレータを比較すると、後者のほうが屈折率が高いため出射面で全反射される割合が高く、出射率は低い。

図 2 の光子の分布は、位置的には各発光点からの寄与が平均している中心部が高く、角度的には垂直方向の出射率が高い。垂直方向への分布はシンチレータの直径と長さの比が小さくなるほど顕著である。このような形状では、低角度で出射する光子は側面で反射を繰返している場合が多く、減衰が激しいためと考えられる。

〈2・3〉 光ファイババンドルへの集光率 光ファイババンドルを用いる場合、直径の小さいバンドルが

図 2 シンチレータ出射面における出射光子の位置・角度分布

Fig. 2. Local distribution and angular distribution of output photons at the scintillator output plane coupled with PMT window.

入手が容易で、一般にはシンチレータ出射面と大きさが一致しない。一方、シンチレーション集光率はバンドル直径やコア面積で決まるバンドルの有効受光面積、ならびに光ファイバの開口径で決まる受光角などによって制限を受ける。すなわち、シンチレータから出射したものの光ファイバのコアに入射しない光子、ならびにファイバの受光角以内で入射しない光子は集光率に寄与しない。

計算ではアクリル系ファイバを想定し、開口数 0.5 で受光角 60° としたが、空気より屈折率の高いシンチレータと組合せる場合にはこれより小さくなり、NaI(Tl) では 32.6° 、BGO では 27.9° となる。従って、幾何学的条件が同じ場合、NaI(Tl) シンチレータを用いるほうが集光率が良い。

図 3 シンチレータ・光ファイババンドル測定系における光子の集光率

Fig. 3. Scintillation collection efficiency calculated for the coupling of various scintillators and optical fiber bundles.

図 4 発光点による光子の集光率の変化

Fig. 4. Scintillation collection efficiency relative to each scintillation point.

簡単化のため光ファイバのコア、クラッドおよびファイバ間げきの区別を省略し、バンドル直径と受光角のみを考慮して集光率を計算した結果を図3に示す。〈2・2〉節の光子の出射率と比較して、集光率は全般に低い値となっている。これは前述の光ファイバ受光角やバンドル直径による制限が付加されたためである。25.4 mm ϕ ×25.4 mm NaI(Tl) シンチレータに順次直径の小さいバンドルを組合せた場合、接続するバンドルの直径が 15 mm、両者の断面積比にして約 0.4 より小さくなると急激に集光率が低下する。これは〈2・2〉節で示したように、シンチレータから出射する光子が出射面の中心部に多く分布していることによる。従って、大形のシンチレータと断面積比が 0.4 より小さい直径のバンドルを直接接続することは望ましくない。

一方、シンチレータの長さを 25.4 mm 一定とし、直径をバンドルに合せて小さくした場合、両者の断面積比は不変であるが、光子の出射率が低下するので測定系全体では集光率の際立った改善は見られない。

また、同じ形状の NaI(Tl) と BGO シンチレータを用いる測定系を比較すると、実効的な受光角から予想されたように前者のほうが高い集光率が得られた。

シンチレーション発光点による集光率の変化を図4に示す。25.4 mm ϕ ×25.4 mm NaI(Tl) シンチレータに直径の小さいバンドルを組合せた場合で、バンドル直径が約 10.0 mm 以上の測定系、あるいはバンドルと同直径のシンチレータを用いる測定系では接合面から遠い点ほど集光率は高い。逆に、バンドル直径が 10.0 mm 未満の測定系では接合面に近い点ほど高い集光率を示した。前者の場合は光ファイバの受光角による制限が支配的であるのに対し、後者の場合には発

光点から接合面を見た立体角が支配的であることによるものと考えられる。

3. 実験

〈3・1〉 実験装置 実験に用いた光ファイバ式シンチレーション測定系の構成を図5に示す。シンチレータと光電子増倍管の間に光ファイババンドルを挿入しているほかは、従来の測定系と同じである。実験に使用したシンチレータ、光ファイババンドルおよび光電子増倍管の仕様を表2に示した。

光ファイバは、高純度メタクリル樹脂 (PMMA) のコアとフッ素樹脂のクラッドからなるアクリル系ファイバで、シンチレータおよび光電子増倍管とは光学セメント OKEN 6262 を用いて直接接続した。これらの光学系全体は黒布によって遮光している。光電子増倍管からの信号は比例増幅器で増幅した後、多重波高分析器で γ 線スペクトルを観測すると共に、シンチレーションの全計数値を求めた。

〈3・2〉 遮光マスクによる実験 光ファイバ式測定系の特性を調べるのに先立ち、シンチレータの出射面積の減少が γ 線検出特性に与える影響について検討した。

25.4 mm ϕ ×25.4 mm NaI(Tl) シンチレータと光電子増倍管の接合面に厚さ 0.02 mm の黒紙の遮光マ

図5 光ファイバ式シンチレーション測定系

Fig. 5. Schematic diagram of a scintillation counting system incorporated with an optical fiber bundle.

表2 実験器具の仕様

Table 2. Specification of the experimental apparatus and parts.

シンチレータ	NaI (Tl)	25.4 mm ϕ ×25.4 mm
	BGO	10.0 mm ϕ ×25.4 mm
	BGO	3.0 mm×3.0 mm×25.4 mm
光ファイバ	250 μ m ϕ ステップインデックス形	
シンチレーション透過率		0.7~0.8 m $^{-1}$
バンドル直径×長さ		25.4 mm ϕ ×1,000 mm
		10.0 mm ϕ ×1,000 mm
		3.0 mm ϕ ×1,000 mm
光電子増倍管	ヘッドオン形	28.0 mm ϕ
		浜松ホトニクス R268

スクを挿入し、マスク中央にあけた穴の直径を変化させて観測した ^{60}Co γ 線スペクトルを図6(a)に示す。光電子増倍管の電極印加電圧ならびに増幅器の利得は一定である。 γ 線スペクトル分布はマスク穴の直径が小さくなるにつれて低チャンネル領域に移動し、15 mm ϕ までは ^{60}Co の二つの光電ピークが明確に識別できるが、10 mm ϕ では識別不可となる。そして5 mm ϕ ではすべての波高値が弁別レベル以下となり、計数は全く得られない。このように γ 線エネルギーに対するチャンネル値が変化するため、以後、波高値はチャンネル番号で表す。

マスク穴の面積と総計数値、最大波高値ならびにモンテカルロ法で求めた集光率を規格化したものを図6(b)に示す。最大波高値および集光率計算値の変化、ならびに光電ピークが不明りょうになることから波高値の減衰は非線形であり、複雑な過程を経ているものと考えられる。マスク穴の面積の縮小に伴う総計数値

(a) ^{60}Co γ 線スペクトル

(b) 総計数値、最大波高値、集光率の変化

図6 遮光マスクを挿入したシンチレーション測定系の特性

Fig. 6. Characterization of a scintillation counting system installed with a holed optical mask.

の減少は、波高分布の低エネルギー部が弁別レベル以下に減衰することに起因している。すなわち、穴の面積が大きく波高値の減衰が小さい間は散乱線領域が弁別されるので計数値の減少はわずかであるが、穴の面積が小さくなると光電ピーク領域が弁別されるようになり、計数値の減少は著しくなる。従って、計数値は増幅器の利得を上げることにより減衰分を回復できるものと考えられる。

〈3・3〉 バンドル直径と測定系の利得の影響

25.4 mm ϕ × 25.4 mm NaI(Tl) シンチレータを用い、これに 25.4, 10.0 および 3.0 mm ϕ の光ファイババンドルを組合せた測定系で測定した ^{137}Cs γ 線スペクトルを図 7 に示す。比較のためにバンドルを使用しない場合の特性も示し、増幅器の利得を変化させて観測した。また、光電子増倍管の印加電圧は -1,300 V で一

定とした。

光ファイバ式測定系では、遮光マスクを挿入した場合と同様、波高値が減衰し、波高分布も大きく変化する。バンドルの長さは 1 m と短いので、バンドルの有効受光面積と光ファイバの受光角が光損失の主因と考えられる。一方、波高分布の変化はこれらの光損失に加えて、光ファイバのモード分散⁽⁸⁾も影響している。

図 7 のスペクトルにおいて増幅器の利得が 34 dB で同一の場合、バンドル直径が小さくなるにつれて最大波高値、計数値ともに低下する。(c) 3 mm ϕ のバンドルを使用した場合には、(a) 25.4 mm ϕ のバンドルを使用した場合に比べて波高値は 1/20、計数値は 1/700 に減少している。これらの低下した波高値および計数値は、増幅器の利得を高めることによって回復できる。これは〈3・2〉節で述べたように、低利得では弁別レベル以下であった信号が利得の増加に伴って弁別レベル以上に回復することによる。しかし、光ファイバを使用しない場合のようなスペクトルは、増幅器の利得を増大しても再現されない。 γ 線の光電ピークはバンドル直径が小さいほど鈍くなり、3 mm ϕ バンドルを用いた測定系では全く認められない。

〈3・4〉 光路直径が同じ測定系の特性 直径 25.4, 10.0 および 3.0 mm ϕ のバンドルに、それぞれ直径の等しいシンチレータを組合せた測定系で測定した ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am の三種類の γ 線スペクトルを図 8 に示す。ここで、比例増幅器の利得は、それぞれの計数値が光ファイバを使用しない場合とほぼ等しくなるように調整した。利得の増加は 10~20 倍程度である。また、エネルギーの高い ^{60}Co や ^{137}Cs γ 線の測定では光電子増倍管の印加電圧を -1,000 V とし、エネルギーの低い ^{241}Am γ 線の測定では -1,300 V とし、測定系の利得を前者より約 4.8 倍高めた。

この場合も光ファイバを用いることにより、波高分布は大きく変化する。図 8 の光電ピークに注目すると低チャンネル側に移動し、その幅が広がって分解能が低下している。 ^{60}Co の 2 種類の γ 線の光電ピークは光ファイバを用いない場合には分離、観測できるが、光ファイバ式測定系では分離できない。

しかし、10 mm ϕ シンチレータと 10 mm ϕ バンドルを組合せた測定系では、〈3・3〉節で示した 25.4 mm ϕ NaI(Tl) シンチレータと 10 mm ϕ バンドルを組合せた場合と異なり光電ピークが明確で、もとの計数値を得るために必要な増幅器利得の増加も少なくてよい。3 mm ϕ バンドルを用いた測定系では、シンチレータが小さいので高エネルギー γ 線ほど検出効率が低く、光電ピークが不明りょうとなる。特に ^{60}Co γ 線に対

図 7 増幅器利得による ^{137}Cs γ 線スペクトルの変化

Fig. 7. Variation of ^{137}Cs gamma-ray spectrum with linear amplifier gain.

図 8 光ファイバ式シンチレーション測定系で得られた γ 線スペクトルの例

Fig. 8. The gamma-ray spectrum obtained with various scintillation counting systems using optical fiber bundle.

しては、光ファイバを使用しない場合でも光電ピークの識別が困難である。しかしながら、もとの計数値を得るために必要な利得の増加は、やはり 25.4 mm ϕ シンチレータと組合せた場合よりも少なくてもよい。シミュレーションではシンチレータとバンドルの光路直径が異なる場合と同じ場合で集光率に大差はなかった。しかし、光ファイバのコア面積で決まる有効受光面積は、計算で設定したバンドル断面積より大幅に小さいため、相対的に光路直径が等しいほうが光損失が少ないものと考えられる。

以上より、光ファイバ式シンチレーション測定系は γ 線強度の検出は容易であるが、 γ 線エネルギーの検出は困難である。従って、連続鋳造用の電磁かくはん炉における γ 線レベル計⁽³⁾、土中挿入形密度計⁽⁹⁾、水中での線量モニタ⁽¹⁰⁾など、計数のみを取扱う測定に適用するのがよい。

4. 光損失に関する考察

〈4.1〉 光ファイバの透光率 今回の実験では長さ 1 m のアクリル系光ファイババンドルを用いたが、実際には更に延長を必要とする場合がある。このような場合には、ファイバ内における光損失を抑制するため、透光率の高い石英系の光ファイバを用いたほうがよい。

また、多量の放射線照射を受けると光ファイバは発光や着色により透光率が変化する。高純度メタアクリル樹脂の損傷を受けない放射線量は 0.02 MGy (2 Mrad) 程度⁽¹¹⁾なので、放射線レベルが非常に高い場合には耐放射線性に優れた光ファイバが必要になる⁽¹²⁾。

〈4.2〉 有効受光面積と受光角 放射線レベルが低く、光ファイバの長さが短い場合には、光ファイバ

バンドルのコア面積で決まる有効受光面積と光ファイバの開口数で決まる受光角が光損失の主因となる。〈3・4〉節で述べたように、直径の小さいバンドルを用いる場合には、これに等しい直径のシンチレータを組合せるほうが光損失が少ない。また、シンチレータの屈折率は空気よりも高いので、これに接合する光ファイバの実効的な受光角を縮小させる。この点、NaI(Tl)とBGOでは屈折率の小さい前者のほうが受光角の縮小が少なく、光損失が少ない。

一方、透光率や耐放射線の点で有利な石英系の光ファイバは開口数0.2前後のものが多く⁽¹³⁾、一般に受光角が狭い。従って、石英系の光ファイバを用いる測定系ではシンチレーション集光率が変化し、アクリル系ファイバを用いる測定系とは異なる γ 線検出特性を示すものと考えられる。

〈4・3〉 接合状態 シンチレータと光ファイババンドル、ならびに光ファイババンドルと光電子増倍管の接合状態が悪いと大きな光損失を生じるが、これは十分な端面処理や接合器具の加工精度を向上することで軽減できる。

5. あとがき

光ファイババンドルを使用するシンチレーション測定系では、バンドルを使用しない測定系に比べて波高値、計数値ともに減少するが、これらは増幅器の利得を上げることで回復することができる。しかし、大幅な光損失などによってエネルギー分解能が低下し、光電ピークは崩れてくる。従って、 γ 線強度の検出は容易であるが γ 線エネルギーの検出は困難であるので、計数のみを取扱う計測に適する。

放射線のレベルが低く、光ファイババンドルの長さが短い場合には、バンドルのコア面積で決まる有効受光面積と光ファイバの開口数で決まる受光角が検出効率に影響する光損失の主因となる。従って、直径の小

さいバンドルを用いる場合には、これに等しい直径のシンチレータを組合せるとよい。また、BGOシンチレータより屈折率の小さいNaI(Tl)シンチレータを用いたほうが光ファイバの実効的な受光角が大きく、光損失の軽減に有利である。

最後に、実験の一部で協力を得た山根康徳氏〔現在横河電機(株)〕に謝意を表する。また、本研究の一部は文部省科学研究費奨励研究(A)の補助を受けて行った。

(昭和63年2月25日受付, 同63年6月15日再受付)

文 献

- (1) Y. Higashiyama, T. Konno & S. Enomoto: "Use of an Optical Fiber Cable in Scintillation Counting System", *Radioisotopes*, **33**, 89 (1984)
- (2) 小管・飯田・住田・田中・木村: 「低損失光ファイバを利用した放射線測定系」, 昭59日本原子力学会分科会C2, p. 174
- (3) 松下: 「光ファイバ式連読レベル計」, 第17回日本アイソトープ・放射線総合会議報告文集, p. 375 (昭60)
- (4) H. Uchida, Y. Yamashita, T. Yamashita & T. Hayashi: "Advantageous Use of New Dual Rectangular Photomultiplier Tube for Positron CT", *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, **NS-30**, 451 (1983)
- (5) F. Adams & R. Dams: *Applied Gamma-Ray Spectrometry*, 2nd edition and revision of original publication by C. E. Crouthamel, p. 39 (1970) Pergamon Press
- (6) 例えば, 電気学会編: 「電気学会大学講座 照明工学」, p. 10 (昭53)
- (7) 同上, p. 169
- (8) 加藤: 光ファイバの基礎と応用, p. 23 (昭58) 総合電子出版
- (9) 沖田・新田・榎本: 「光ファイバ式 γ 線散乱型密度計」, *Radioisotopes*, **37**, 513 (1988)
- (10) 沖田・東山・榎本: 「光ファイバ式シンチレーション検出器による線量サーベイ」, 第24回理工学における同位元素研究発表会, 30 a-1-3 (昭62)
- (11) G. Földiák (editor): *Industrial Application of Radioisotopes*, revised and enlarged version of original publication by Mészaki Könyvkiadó, p. 415 (1986) Elsevier Science
- (12) 電気学会編: 絶縁材料研究会資料, EIM-84-27-37 (昭59)
- (13) オプトロニクス, **1**, 72 (昭57)