

Radiation Distribution Sensing with Normal Optical Fiber

Jun KAWARABAYASHI Ryoji MIZUNO Ryotaro NAKA Akira URITANI Ken-ichi WATANABE Tetsuo IGUCHI Norio TSUJIMURA*

> Department of Nuclear Engineering, Nagoya University *Radiation Protection Division, Tokai Works

光ファイバーを用いた放射線分布センシングは、簡便な計測システムで、広域の放射線分布を連続的に測定可 能とする新技術として、種々の応用展開が期待されている。これまで主に用いられてきたシンチレーションファ イバーではなく、光減衰の小さい通常のプラスチック光ファイバー(POF)においても放射線との相互作用で微 弱シンチレーション光が発生することに着目し、これを用いることにより測定可能距離を大幅に延ばすとともに、 その低検出効率を逆に活かして、より高フラックス下における放射線分布測定への適用可能性を検討した。その 結果、これまでのシンチレーションファイバーを用いた場合に比べ、測定可能距離を数mから約100mへと二桁 のばすことできた。また、原子炉周辺や加速器、核融合実験装置環境等における放射線モニタリングへの適用の 可能性が示された。また、ファイバー出力に対する分光学的片側読み出し手法を新規に考案し、その基本原理を 実証した。

The purpose of this study is to develop a radiation distribution monitor using a normal plastic optical fiber. The monitor has a long operating length (10m~100m) and can obtain continuous radiation distributions. A principle of the position sensing is based on a time-of-flight technique. The characteristics of this monitor to beta particles, gamma rays and fast neutrons were obtained. The spatial resolutions for beta particles ($^{90}Sr^{.90}Y$), gamma rays (^{137}Cs) and D-T neutrons were 30 cm, 37 cm and 13 cm, respectively. The detection efficiencies for the beta rays, the gamma rays and D-T neutrons were 0.11%, $1.6 \times 10^{.5}$ % and $5.4 \times 10^{.4}$ %, respectively. The effective attenuation length of the detection efficiency was 18m. New principle of the position sensing based on spectroscopic analysis was also proposed. A preliminary test showed that the spectrum observed at the end of the fiber depended on the position of the irradiated point. This fact shows that the radiation distributions were calculated from the spectrum by mathematical deconvolution technique.

キーワード

分布測定,プラスチック光ファイバー,シンチレーションファイバー,放射線,検出効率,光電子増倍管,TOF



97

Radiation Distribution Monitor, Normal Plastic Optical Fiber, Sintillation Fiber, Detection Efficiency, Time-of-Flight, Beta Particle, Gamma Ray, Fast Neutron, Attenuation Length

1.はじめに

光ファイバーの原子力関連分野における利用 は,これまでの同軸ケーブルに対し非電磁誘導や 低損失等多くの利点があるため急速に進みつつあ る。 この光ファイバーを用いた原子力関連分野 応用の中で放射線計測応用に着目すると、広域放 射線分布センシングを目的とした多くの研究がな されている。一例としてBragg回折格子を光ファ イバーに組み込んだセンサの開発が行われ,格納 容器,蒸気配管のモニタリング,水素発生リスク の低減等への適用が行われている。さらに光ファ イバーに入射したレーザー光パルスが発生する Raman 散乱光の強度を検出することによる空間温 度分布測定法の開発,シンチレーター塗布光ファ イバー法による原子炉内放射線線量率分布測定 法い及び原子炉内中性子束分布測定法の開発い、プ ラスチックシンチレーションファイバー(PSF)の 発光伝播時間差から放射線入射位置を行う方式に よる高速中性子の位置分布測定法の研究"放射線 損傷により石英ファイバー中に生成される着色中 心を利用した荷電粒子検出器の開発・)放射線場に おける温度変化により蛍光特性の変わる蛍光物質 と光ファイバーからなる放射線源内蔵・自己出力 型温度センサーの開発。シンチレーターと波長シ フトファイバーを組み合わせた放射線場の多点分 布測定法の開発。等が行われている。

ここで,研究用の原子炉や加速器等の研究を主体とする装置にあっては,人体または実験装置の線源への近接,バックグラウンド放射線の挙動が大きな問題となり対象となる空間・場の線等の放射線強度を測定することは非常に重要となる。 さらに核燃料加工工場等においても,核燃料製造 過程における迅速な放射線モニタリングを行い, その汚染を最小限に食い止める必要がある。また, 高レベル放射性廃棄物の一次保管,地層処分場等 についても,その安全性確保のために常に環境放 射線のモニタリングが必要である。核燃料1トン (MTU)から製造されるガラス固化体は,例えば 日本原燃(株)の高レベル廃棄物ガラス固化体の場 合,約13本であるが,再処理されてガラス固化体 にした場合の一時保管時の放射能は1MTU当た **り約10**'GBqと非常に高い。

これらに要求される検出器の性能は,広域にわたるリアルタイムかつ連続な放射線モニタリング及び強放射線場における測定能力である。さらに 狭隘空間に対する適用性,耐電磁特性,簡便な測定システムによる高信頼性等が要求される。

以上の要求に耐えられる放射線センシングシス テムの開発として,光ファイバーの特性に注目し た結果,通常のプラスチック光ファイバー(Plastic Optical Fiber:POF)を用いた広域かつ連続な放 射線センシング手法の開発を目的とした研究を 行った。すなわち,光ファイバーに放射線が入射 した場合に発する光を、ファイバー端から光検出 器で読み出しその発光位置すなわち放射線入射位 置を同定することを基本原理とする。光ファイ バーは狭隘・複雑空間に柔軟に対応でき耐電磁環 境性を有するが,これまで主にリアルタイム測定 に用いられてきたPSFでは減衰長が短く(減衰長: ~ 3m) 適用範囲が制限されるため, 我々は減衰 長が長いPOFを利用することにした。また,測定 手法として光ファイバーの両端に到達する光子の 時間差から位置を決定するTime of Flight法(TOF 法)を基本とし,さらに今回新たに分光学的手法 に基づく新位置検出手法の開発も試みた。以上か ら本測定システムは簡便な測定系を有し,より高 い信頼性を持ち、長距離伝送性、耐放射線性、コ スト面等においても高い優位性を持つことが期待 される。

2.TOF読み出し法の測定システム

測定システムを図1に示す。本システムは大き く検出器と外部回路の二つに分けることができる。 検出器はPOFと光電子増倍管(PMT)からなり,外 部回路は前置増幅器, Constant Fraction Discriminator (CFD), Time-to-Amplitude-Converter (TAC) 及びMulti Channel Analyzer (MCA)からなる標準 的なTOFシステムである。PMTは浜松ホトニクス 製,R1635を採用した。POFは放射線相互作用に よる発光量が少ないことが予想されるため,ゲイ ンが大きくかつ応答速度が速いという2点を選定 基準とした。また分光感度については,代表的な



PMT:光電子增倍管

PA:前置増幅器 CFD:コンスタント・フラクション・ディスクリミネータ DA:ディレイアンプ TAC:タイム・トウ・アンプリチュード・コンバータ MCA:多重波高分析装置

図1 TOF読み出し法の測定システム

プラスチックシンチレータNE102の最高放出波長 が423nmであることから,光ファイバーの発光波 長範囲を300から500nm程度と予想した。

前置増幅器はSEIKO EG&G ORTEC VT120を使 用した。この前置増幅器によりPOFの微少信号を より感度よく検出できることが期待される。また, 発生光子数が微少であることより,PMT及び前置 増幅器の高ゲインを利用して測定を行うことか ら,信号波形の形状の変化よりも入力波高の揺ら ぎの影響が大きいと考えられるため,波高ウォー クによるタイミングのずれが少ないCFDを測定 に用いた。

TACからの信号はMCAにより波高分布として 記録される。このデータは測定終了後に解析処理 を行い,横軸の位置決め等が行われる。しかし光 ファイバーの長さの変更や測定装置のケーブルの 変更などタイミングや時間に強く影響する変更が ない限り測定結果の処理に必要なパラメータは基 本的に変化しないため,測定体系の幾何学的配置 等が変化しない状況においては,リアルタイム測 定が可能である。

本研究で使用した光ファイバーは三菱レーヨン 製 Eska SH8001 である。光ファイバーの直径は 2 mm,ステップインデックス型,マルチモード 光ファイバーであり,コア径が1 96mmである。 コアの素材はポリメチルメタクリレート,クラッ ドが特殊フッ化物であり,コアの屈折率は1 492, クラッドの屈折率が1 402である。

3.TOF 読み出し法の基礎特性評価実験

3.1 各種放射線に対する応答評価

各種放射線に対する応答測定は基本的にTOFシ ステムと全長10mのPOFを組み合わせて実験を 行った。

(1) 線応答測定

³⁰Sr³⁰Yの 線を用いて検出器応答実験を行っ た。 線源の強度は14kBqである。 線をSTART 側のPMTから150cm,250cm,350cmの3地点に 入射した際の検出器応答の結果を図2に示す。3 地点とも測定時間は6 450秒であった。位置分解能 は半値幅(FWHM)にして,ファイバー長10mに 対し30cm,検出効率は(1.1±0.1)×10³であった。 (2) 線応答測定

次に 線に対する検出器応答実験を行った。 線源は¹³⁷Csを用い,その強度は54 2MBqであっ た。線源からの 線は 55mmにコリメートされ ており, 線の場合と同じくSTART側のPMTから 150cm,250cm,350cmの3地点に入射した際の 検出器応答の結果を図3に示す。3地点とも測定 時間は36,000秒であった。位置分解能は10mに対



図 2 10m長ファイパーの 3 箇所に 線を入射した 場合の測定結果



図3 10m 長ファイバーの3箇所に¹³⁷Cs 線を入 射した場合の測定結果

し37cm,検出効率は(1.6±0.2)×10⁷であった。 (3)核分裂中性子応答測定

D D中性子程度の速中性子に対する検出器応 答を評価するため,東京大学大学院工学系研究科 付属原子力工学研究施設「弥生炉」にて核分裂中性 子(擬似D D中性子)に対する検出器応答実験を 行った。図4に弥生炉の断面図とPOFの設置位置 を示す。POFはファーストカラムのビーム孔の出 口に設置し,POFの2箇所に同時に中性子入射を 行った。START側のPMTから450 cm,600 cmの2 地点に同時に入射した際の検出器応答の結果を図 5に示す。フラックス及びフルエンスは45× 10° n/cm²・sと8.1×10^on/cm²であった。どちらの ピークに対しても位置分解能は10mに対し33 cm, 検出効率は(8.7±0.1)×10⁷であった。

(4) D T中性子応答測定

D T中性子(14 MeV) に対する検出器応答を評



における実験配置

価するため,日本原子力研究所Fusion Neutronics Source (FNS)にて検出器応答実験を行った。実験 体系図を図6に示す。POFはメインコリメータの ビーム出口に設置した。また厚さ40cmのポリエチ レンを使用して中性子の遮蔽を行い,中性子ビー ムのみ遮蔽した測定も行った。フラックス及びフル エンスは,12×10^cn/cm²・sと72×10^cn/cm²で あった。結果を図7に示す。位置分解能は,10m に対し13cm,検出効率は(54±06)×10^cであっ た。またポリエチレンにより中性子が遮蔽される とビークがかなり低くなるため,放射性同位体に よる 線に対する検出器の応答ではないことがわ かった。

以上により種々の放射線に対する検出効率及び 位置分解能の一覧を表1に示す。本測定システム は線に対して14 MeVのD T中性子の感度が約 30倍高いことから,特に核融合炉における中性子 発生プロファイル測定において線の影響の少な い中性子測定が可能であると考えられる。



図5 ファイバーの2箇所に高速核分裂中性子を入 射した場合の測定結果



ビーム入射ライン

図6 原研FNSにおける実験体系図(コリメータ出 ロにファイバーを設置)



図7 10m長ファイバーの14MeV中性子に対する 応答(ポリエチレン中性子遮蔽あり なしの比 較)

線源	強度	検出効率	FWHM	
90Sr-90Y	14 (kBq)	0 .11%	30 cm	
¹³⁷ Cs	54.2 (MBq)	1.6 × 10⁵%	37 cm	
核分裂中性子	4 5 × 10°(cm ⁻² s ⁻¹)	8 .7 × 10 ^{-₅} %	33 cm	
D-T中性子	1 2 × 10°(cm ⁻² s ⁻¹)	5 <i>A</i> × 10 ⁻⁴ %	13 cm	

表1 各種	헶射線源	に対する	ら応答特性	一賢
-------	------	------	-------	----

32 ファイバー長依存性評価

本測定システムの特長である長距離測定性能を 評価するため,ファイパー長依存性評価実験を 行った。

(1) 長距離測定

日本原子力研究所FNSにおいて50mと100mの POFを用いたD T中性子に対する長距離測定実験 を行った。50mの光ファイバーを使用した実験で はSTART側のPMTから10mの地点に中性子を入 射した。フラックスは2 5×10^cn/cm²・s,フルエン スは1 8×10^cn/cm²であった。その結果を図 8 に示 す。位置分解能は全長50mに対して90 cm,検出効 率は(2 5±0 52)×10⁷であった。100mの光ファイ バーを用いた実験ではSTART側のPMTから20m の地点にD T中性子を入射した。フラックスは2 2 ×10^cn/cm²・s,フルエンスは3.1×10^cn/cm²であっ た。その結果を図 9 に示す。位置分解能は全長50m に対して130 cm,検出効率は(4 3±0 50)×10^eで あった。

(2)長距離化に伴う位置分解能及び検出効率の位置依存性測定

PSFではファイバー長が2 5mであったのにも 関わらずPSFの端の部分と中央の部分に放射線を



図8 50m長ファイバーの14MeV中性子に対する 応答



図9 100m長ファイバーの14MeV中性子に対する 応答

入射した場合,位置分解能が変化するという位置 依存性があった⁷。そこでPOFの諸特性に対する位 置依存性を評価するため,東大弥生炉の核分裂中 性子ビームに対し,全長20mのPOFを用いて実験 を行った。測定はSTART側のPMTから10m,12m, 14m,16mの4地点で行い,フラックス及びフル エンスはそれぞれ共に9.0×10^{en}/cm²・sと5.4× 10^{en}/cm²であった。この実験結果を図10に示す。 ファイバー長が10mの場合と同じく,位置分解能 はどの位置においても等しく33cmであり,検出効 率も位置分解能と同様にどの位置においても(7.0 ±0.2)×10⁷であった。

33 発光スペクトル評価及び放射線損傷評価

放射線の重照射による発光特性や光伝送特性の 変化による発光スペクトルの変化から, POFの放



102



図10 入射位置の違いによる測定結果の比較

射線による損傷を評価することができる。日本原 子力研究所[®]Co照射施設においてPOFの発光波長 の測定を行い,放射線損傷による発光量の変化や 波長の変化の測定を行った。分光器は浜松ホトニ クス製PMA 11であり,露光時間を5sec.とした。 照射するファイバーとして二つのタイプを用意し た。一つはセパレートタイプで1mのPOFにフジ クラ製石英ファイバー(コア径0.76mm)を接続し たものであり,もう一つはPOFをそのまま用いた ノーマルタイプである。セパレートタイプで14時 間,1 2×10[®]Gy照射し,ノーマルタイプでは16時 間,1.6×10[®]Gy照射し十分に放射線損傷を生じさ せた。その前後の発光波長測定を行った結果を図 11及び図12に示す。ノーマルタイプについては, 短波長側で著しい劣化が見られる。







図12 大線量の照射前後における発光スペクトルの 変化(ノーマルタイプ)

4.TOF読み出し法の基本特性に関する考察 4.1 位置分解能

実用システムを考慮すると位置分解能の向上は 重要事項であり,位置分解能を決定する主要因を 知る必要がある。上記TOF法を用いた測定システ ムにおいて,発光信号の立ち上がり時間分布が位 置分解能に大きく影響すると考えられる,入力信 号の立ち上がり時間分布の測定を行った。この測 定装置について図13に示す。ファイバー長は20m を用い,[®]Sr[®]Y線源の 線をPMTから5mの位置 に入射し,30分測定を行った。この結果を図14に 示す。やや遅れた発光成分が見られ,立ち上がり 時間分布のFWHMは0.76nsであった。POFを透過 する光子の平均的な速度は5.3ns/mであることか ら,5mの長さのPOFを透過してきた信号は,長 さにして14cmのばらつきを持つことになる。

上記立ち上がり時間分布は次の2つのファク ターにより構成されていると考えられる。1つは 発光光子のPMT到達時間分布であり,もう1つは PMTの電子走行時間分布である。使用したPMT: R1635の電子走行時間分布はFWHMにして05ns (カタログ値)である。この値と上記立ち上がり時



図13 立ち上がり時間測定用の実験システム図

研究報告

研究報告



ド計数を考慮したシングル計数は489 400 counts/h であった。このことにより,PMTの光電面に到達 した全信号量(シングル計数)あたりの位置情報を 有する有効信号量の割合(ピーク面積/正味のシ ングル計数)は0.7%であると結論づけられ,本シ ステムの検出効率が低いことの理由の一つである と考えられる。

4.3 偶然同時計数

測定システムの分解時間 はTACの測定時間に 依存する。図15の場合TACの測定時間は200nsで あり,片側のPMTで計数されるシングル計数率 n は307 cpsであった。偶然同時計数rchは,

 $r_{ch} = n^2$ (3.1)

で表されるため0 019 cpsとなる。

一方,図15において,偶然同時計数はピークで はなく全チャンネルにわたる連続成分として記録 される。図15におけるこの連続成分は021cpsと なった。この結果,単純な偶然同時計数では実験 の連続成分を十分に説明できないことがわかった。 この偶然同時計数と連続成分の食い違いを説明

するため以下のシミュレーション計算を行った。 まず図15の実験条件を模擬するため、POFの5m



図15 10m長ファイパーの中央に 線を入射した場 合の測定結果



図14 PMTから5m位置に 線を入射させた場合 の立ち上がり時間分布測定結果

間分布0.76nsにより,光子の到達時間分布を 0.57nsと見積もることができる。さらに位置分解 能を左右する要因としてCFDのTime Walkが挙げ られる。CFDの条件をCF Dlayを2ns,入射信号 のパルス幅を10nsとし 100mV ~ 2Vのレンジで 信号を入射した場合,Time Walkは±02ns程度と 見積もられる。

この光子の到達時間分布,PMTの電子走行時間 分布,CFDのTime Walkの3つの要因は2組の測 定系列に等しく影響を及ぼすので,この2系列に よるばらつきは1.1ns程度に見積もられる。これ は長さにして021cmに等しい。線に対する位置 分解能の実験結果は033cmであったことから,こ の3つのばらつきが位置分解能に大きく影響して いると結論づけられる。

線は電子(線)に比べて一回の相互作用にお ける発光量が少ないことから立ち上がり時間に変 化が生じやすく電子走行時間分布も広がると考え られるため,線に対する位置分解能の低下は発 光量に関係があると考えられる。同様に14 MeVの D T中性子による発光は発光量が大きいため特に 電子走行時間の影響を受けにくく,分解能が向上 していると考えられる。

4.2 検出効率

本システムの検出効率は10^{3~7}と低い結果と なった。この検出効率の向上のために,PMTまで 到達した全光子量の内にどれだけ有効な信号が含 まれているのかという点を評価する必要がある。 そこで10m長のPOFの中間位置に[®]Sr[®]Y 線源の 線を入射した際のTAC信号による位置情報を示 到達時間からPMTの信号立ち上がり時間を計算 し、この信号の立ち上がり時間分布をTACの START信号及びSTOP信号の時間分布とし計算を 行った。 このシミュレーションにおいて計算された

PMTの立ち上がり時間分布とTACによる入射位 置計算結果を図16及び図17に示す。図17ではPOF の中心である5mを示す53nsのところにピークが あり,またピークの形状が実験値とよく似ている ことから,シミュレーションが本測定システムを 再現していることがわかる。

この結果から偶然同時計数では説明できなかっ た連続成分の部分にも計数があることが示され







図17 計算によって求めたPMTの立ち上がり時間 分布から求めたTACによる時間差分布

た。すなわち,本シミュレーションにおいて偶然 同時計数は存在しないが,ピーク部以外に長い テールを引いており,実際の測定の際には偶然同 時計数の連続成分と重なって観測されることにな る。またシミュレーション結果を解析することに より,この連続成分は立ち上がり時間の遅い成分 の影響であることがわかった。

4.4 長距離測定性能評価

長距離測定実験ではファイバー長100mまで測 定を行い, 微弱ながらピークを得ることができた が, 有効な検出効率を有する長さ, つまり測定可 能長として評価できる長さは50mまでであると考 えられる。この結果により, PSF方式に比べ約17 倍の長距離連続測定性能を実証することができ, 本測定システムの優位性が示されたと言える。

また減衰長を求めるため,D T中性子による 10m ,50m ,100mの3種類の検出効率実験結果と, 20mの結果については核分裂中性子による10m及 び20mの結果から推定した検出効率を用いて評価 を行った。その結果を図18に示す。μ=0.057m⁻¹ であったことから,減衰長を18mと見積もること ができた。

45 発光波長測定及び放射線損傷

発光波長については, 線照射部分をPOF,光 伝送部分を石英ファイバーに分けたセパレートタ イプの実験結果(図11)から,400nm付近から



600nmあたりまで,波長の2乗に比例するチェ レンコフ発光の様子が観察され,シンチレーショ ン発光であるとわかるピークは観察できなかっ た。セパレートタイプの実験とノーマルタイプの 実験の比較から,光子が10mの長さを透過してく る間にPOFによる光の吸収・散乱が生じているこ とがわかった。使用したPOFと同じ材料を用いた 直径1mmの三菱レーヨン製ESKA SH4001の光 ファイバーの波長別減衰例では,特に550nm, 600nmの波長で光の減衰が起こるとされている。 図12の測定結果においてもESKAの波長減衰例同 様550nmと600nmの波長で減衰が起こっている ことがわかった。また400nmよりも短波長側につ いては光の減衰が激しいことが分かった。

また,セパレートタイプの実験結果から放射線 損傷が十分に起きるだけの線を照射したところ,発光量はわずかに低下することがわかった。 それに対し,ノーマルタイプの実験結果では 600nmよりも短波長側で大幅に減衰しているこ とがわかった。両者の比較から放射線損傷は発光 量に対してではなく,光透過特性に対して大きく 影響すると結論づけられる。

現在のPOFは高速中性子で10¹²⁻¹³n/cm², 線で 10³⁻⁴Gyで劣化が始まるため,現在のままでは核融 合炉等での強放射線場での使用は困難である。石 英ファイバーであればフッ素を添加して耐放射線 性を高めたファイバーがあり,高速中性子で 10¹⁶n/cm², 線では10⁶Gyを超える性能を持った ものもある。このような耐放射線能力の高NPOF の開発も重要であろう。

しかし図12から600nm以上の長波長側では放 射線損傷の影響が少ないことがわかった。この波 長領域の信号を利用することができれば放射線損 傷の影響を回避することができるため,現在の POFでも優れた耐放射線性能を発揮することは不 可能ではないと結論づけられる。

5.分光学的手法による新読み出し法の検討

従来の読み出し法であるTOF法を用いた場合, 上記考察に示されるように,ファイバーからの光 子のうち有効利用されている割合が0.7%しかな い。そこで,到達するすべての光子を利用して検 出効率を向上させるために,分光学的手法による 読み出し法を考案した。すなわち,POFで放射線 相互作用により生じた発光の,ファイバー端面で 観測されるスペクトルは,波長ごとに減衰度合い が異なるため,透過してきたPOFの長さにより異 なったスペクトルを示す。このスペクトルに対し 数学的操作を施すことにより,放射線の入射位置 情報を取得することを基本原理とするものであ る。TOF法等のパルス計数方式では分解時間によ るパイルアップや偶然同時計数が問題となり,検 出限界に達する可能性があるが,この方法では露 光時間が可変であるのでこのような問題を回避す ることができ,より高計数率時に適用可能となる と期待できる

本手法の有効性を確認するため,名古屋大 学[®]Co照射装置を用いてスペクトル測定実験を 行った。30mファイバーの分光器を接続した端 から10m,20m,30m地点を空気カーマ率 2,800kGy/h(照射線量率320kR/h)の位置とし, それぞれの場合の応答スペクトルを図19に示す。 ファイバー長さに依存して,特定の波長の強度が 減衰していることが分かる。このスペクトルデー タより,吸収の著しい570nm,650nmの強度と吸 収が顕著でない620nmの強度比の対数に対し ファイバー長をプロットした図を図20に示す。ほ ぼ直線的になり,これによりファイバーーカ所に 放射線が入射した場合は位置が決定できることが 確かめられた。

しかしながら,用いた分光器は光測定器として B CCDを使用しており,PMTと比べて感度が落 ちるため,当初の目的である検出効率の向上は達 成できなかった。MCP等,信号増幅機能の付した 分光器を使用する必要がある。



図19 10m,20m,30mの位置に 線を照射した 場合に分光器で観測した発光スペクトル





図20 吸収の著しい波長とあまり吸収されない波長 の発光強度比とファイバー長の関係

6.まとめ

POFとTOF測定システムの基礎特性を評価する ため線,線,核分裂中性子,DT中性子に対 する応答評価を行い,様々な線種に対する検出効 率及び位置分解能を評価した。さらに検出効率及 び位置分解能の位置依存性の評価を行い,位置依 存性が表れていないことが示された。

また本手法の位置分解能について詳細に検討を 行い,位置分解能を決定する主要因は発光信号の 立ち上がり時間のばらつき,光電子増倍管の電子 走行時間分布,CFDのTime Walkであることがわ かった。発光量の増加に伴い,この3要因のばら つきは減少するため,位置分解能を向上させるた めには発光量の増大は不可欠である。

検出効率について詳細に検討を行うため光電子 増倍管の光電面に到達する光子による全信号量に 対する有効信号量の比較を行った。その結果全信 号量に比べ有効信号量は0.7%程度と非常に少な いことがわかった。このとき偶然同時計数から求 めることのできるバックグラウンドに対して実測 したバックグラウンドの方が多いことがわかり, 解析を行った結果,立ち上がり時間の遅い信号が 存在し,これらの信号により位置信号を有してい るはずの信号があたかもバックグラウンドとして 測定されてしまうことがわかった。

この測定システムの利点である長距離測定能力 を評価し、PSFを用いる方式と比較して約17倍の 測定距離となる50mのPOFを用いた広域の放射線 場分布センシングが可能であることを実証した。 これら検出効率から減衰長が約18mとなると評価 した。さらにPOFの発光特性を把握するため発光 スペクトルの測定を行った。POF内を透過する光 子は、光ファイバー自身の光子の吸収・散乱により 波長ごとに異なった減衰をすることがわかった。 また放射線損傷を人為的に生じさせ、その発光ス ペクトルの比較・評価を行った結果 放射線損傷に よる影響は、発光特性ではなく光伝送特性に対し て大きいことがわかった。

このようにPSF方式に比べ,はるかに長距離測 定性能や強放射線場適応能力に対して優位性を有 しており,原子炉や加速器周辺,核燃料製造工場, 高レベル放射性廃棄物の一次保管,地層処分場等 における放射線モニタリングや,核融合炉におけ る中性子発生プロファイル計測等に対しての適用 が期待できる。

しかしながら,高速中性子で約10¹²⁻¹³n/cm², 線では10⁸⁻⁴Gyで劣化が始まるため,現在のままで は核融合炉等での強放射線場での使用は困難であ る。耐放射線性能の高いPOFの独自開発も視野に 入れた研究が重要であると考えられる。

また,有効信号が0.7%しかないことより,残り の発光信号の利用することで検出効率の改善,測 定可能距離の増大が可能であると考え,光ファイ パーの片側から発光スペクトルを読み取ることで 位置情報を取得する方法を考案し実験的に実証し た。この新しい読み出し法は,露光時間を変化さ せることができるためパイルアップ等の問題をク リアしやすく高ダイナミックレンジが期待される。

今後の課題として,発光量の増大及び耐放射線 性能を引き上げることがまず重要である。また, 実際のプラントへの応用を目的とした設計検討を 行い実証試験へと進めていくことが必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり,日本原子力研究所 の角田恒己氏,竹内浩氏,金子純一氏(現北海道大 学),落合謙太郎氏,東京大学原子力工学施設の小 野双葉氏に多大な協力,ご指導を賜りましたこと を感謝いたします。

参考文献

- 1)景山 一巳:"研究用原子炉内放射線線量率位置分布 の測定 '名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専 攻 修士論文(1997)
- 2) 三戸 祐一郎: " 光ファイバーを用いた原子炉内中性 子束分布測定法の開発 "名古屋大学大学院工学研究

科原子核工学専攻 修士論文(1996)

- 3) T. Oka, H. Fujiwara, et. Al." Development of Fiber Optic Radiation Monitor using Plastic Scintillation fibers, "J. Nucl. Sci. Technol., vol. 35, no. 12, pp. 857 864 (1998).
- 4) J.J.Suter, J. C. Poret et al.: "Ionizing Radiation Detector using Multimode Optical Fibers, "IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 40, Issue 4, p466 469 (1993)
- 5) S.A.McElhaney, D. D. Falter et al." Passive (Self Powered) Fiber Optic Sensors, "Conference Record

of the 1992 IEEE Nucl. Sci. Sym., Oct. 25 31, p101 103 (1992).

- 6) T. Maekawa: "Optical Waveguide Scintillator, 'Hoshasen, vol. 21, no. 3, pp. 69 78, (1995) (in Japanese).
- 7) E. Takada, K. Sugiyama et al.: "Neutron Radiation Distribution Sensor Using Flexible Plastic Scintillating Fiber Combined with the Time of Flight Technique, "IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 42, No. 4, p570 574 (1995).