資料番号:17-8



# 通常光ファイバーを用いた 強放射線分布センシング法の開発

河原林 順 水野 良治 中 亮太郎 瓜谷 井口 哲夫 渡辺 賢一 计村 憲雄\*

> 名古屋大学大学院 丁学研究科 東海事業所 放射線安全部

Radiation Distribution Sensing with Normal Optical Fiber

Akira URITANI Jun KAWARABAYASHI Ryoji MIZUNO Ryotaro NAKA 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 (\*9Sr\*99Y), gamma rays (\*137Cs) 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%,  $1.6\times10^{-5}$ % and  $5.4\times10^{-4}$ %, 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

水野 良治

.. 博士前期課程



瓜谷 現在,産業技術総合研究所 計測標準研究部門 放射線計測・中性子計測に 従事 博士(丁学). 放射線取扱主 任者,核燃料取扱主任者





渡辺 腎-名古屋大学工学部 文部科学教官助手 放射線計測・レーザー共鳴 に従事 修士(工学), 放射線取扱主



井口 哲夫 名古屋大学大学院工学研究科 教授 放射線計測·核融合中性子 ドシメトリーに従事 工学博士,放射線取扱主任





辻村 憲雄 線量計測課 標準·校正 チーム所属 チームリーダ, 副主任研 究員 放射線測定器等の校正に用 いる放射線(能) 標準の維 持, 開発業務に従事

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シ、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③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が放射線場に 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が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 布測定法の開発が等が行われている。

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

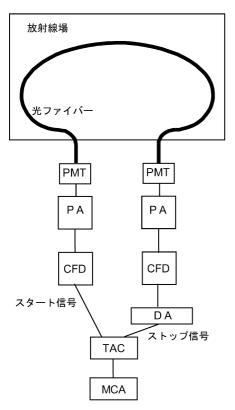
り約10GBqと非常に高い。

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:前置增幅器

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・コンパータ

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196mm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1492,クラッドの屈折率が1402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

\*\*Sr\*\*\*Y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「『Csを用い、その強度は54 2 MBq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

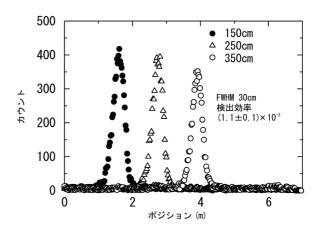


図2 10m長ファイバーの3箇所に 線を入射した 場合の測定結果

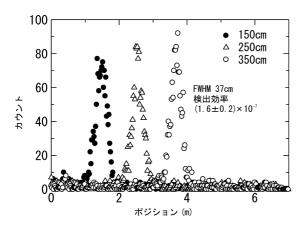


図3 10m長ファイバーの3箇所に<sup>137</sup>Cs 線を入 射した場合の測定結果

し37cm,検出効率は(1.6±0.2)×10<sup>7</sup>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450cm、600cm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㎡/cm²・sと8.1×10㎡/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33cm、検出効率は(87±0.1)×10㎡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

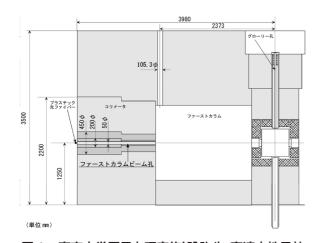


図 4 東京大学原子力研究施設「弥生」高速中性子炉 における実験配置

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, $12 \times 10^{\circ}$ n/cm²・sと $72 \times 10^{\circ}$ n/cm²であった。結果を図 7 に示す。位置分解能は,10 mに対し13 cm,検出効率は $(54 \pm 06) \times 10^{\circ}$ 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ピ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。

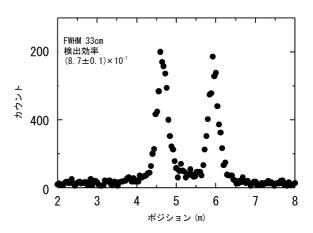


図5 ファイバーの2箇所に高速核分裂中性子を入 射した場合の測定結果

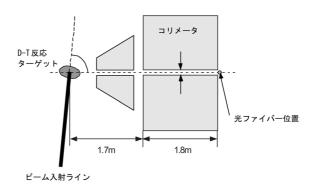


図 6 原研FNSにおける実験体系図(コリメータ出 ロにファイバーを設置)

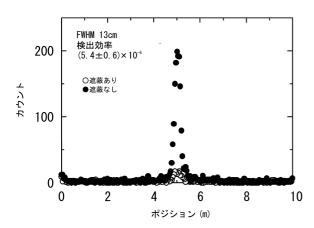


図 7 10 m長ファイバーの14 MeV中性子に対する 応答(ポリエチレン中性子遮蔽あり なしの比 較)

表1 各種放射線源に対する応答特性一覧

線源	強度	検出効率	FWHM
<sup>90</sup> Sr <sup>-90</sup> Y	14 (kBq)	0 .11%	30 cm
<sup>137</sup> Cs	54.2 (MBq)	1.6 × 10 <sup>-5</sup> %	37 cm
核分裂中性子	4 5 x 10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	8 .7 × 10⁻5%	33 cm
D-T中性子	1 2 × 10°( cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	5 4 × 10 <sup>-4</sup> %	13 cm

### 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,ファイバ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<sup>6</sup>n/cm<sup>2</sup>・s ,フルエンスは1 8×10<sup>6</sup>n/cm<sup>2</sup>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90cm ,検出効率は(2 5±0 52)×10<sup>7</sup>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<sup>6</sup>n/cm<sup>2</sup>・s ,フルエンスは3 .1×10<sup>6</sup>n/cm<sup>2</sup>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130cm ,検出効率は(4 3±0 50)×10<sup>8</sup>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

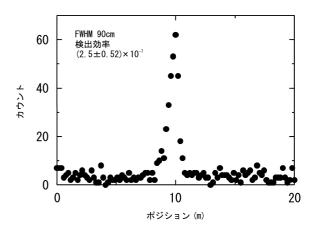


図 8 50 m長ファイバーの14 MeV中性子に対する 応答

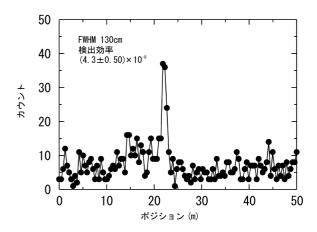


図 9 100 m長ファイバーの14 MeV中性子に対する 応答

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"。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 $0 \times 10^{\circ}$ n/cm²・sと5 $4 \times 10^{\circ}$ n/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 $0 \times 10^{\circ}$ )×10 $^{\circ}$ 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

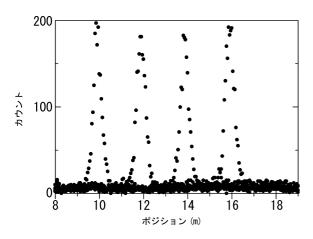


図10 入射位置の違いによる測定結果の比較

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 5 sec.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 1 m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。

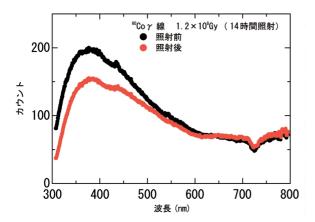


図11 大線量の照射前後における発光スペクトルの 変化(セパレートタイプ)

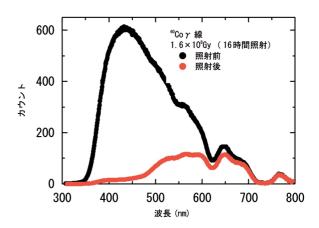


図12 大線量の照射前後における発光スペクトルの 変化(ノーマルタイプ)

# 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

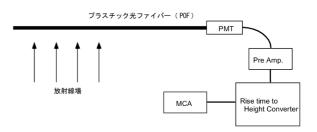


図13 立ち上がり時間測定用の実験システム図

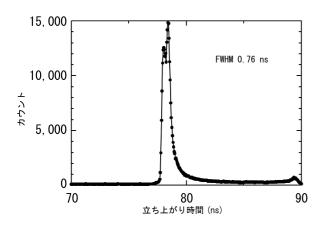


図14 PMTから 5 m位置に 線を入射させた場合 の立ち上がり時間分布測定結果

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~ 2 Vのレンジで信号を入射した場合,Time Walkは±0.2ns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0.21cmに等しい。線に対する位置分解能の実験結果は0.33cm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°~~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

す計数と,片側のPMTだけで測定した場合の計数との比較を行った。

図15にこの結果を示す。図より位置情報を示すピークの面積は3 251 counts/hで, PMTのシングル計数は1,106 240 counts/hであり, 線が入射していない場合のシングル計数は616 840 counts/hであった。この 線が入射していないバックグラウン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

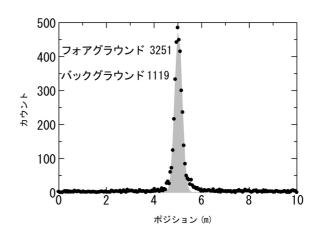
測定システムの分解時間 はTACの測定時間に依存する。図15の場合TACの測定時間は200nsであり、片側のPMTで計数されるシングル計数率nは307cpsであった。偶然同時計数rchは、

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

で表されるため0 019cps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0 21cps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



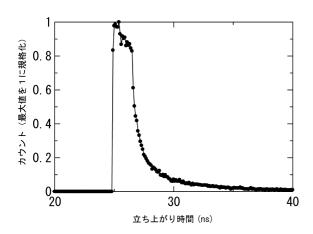
網掛け部分が位置情報を有する有効信号量である。

図15 10m長ファイバーの中央に 線を入射した場合の測定結果

地点で放射線による発光が生じたと仮定し,直径 2 mm,長さ 5 mのPOFを透過してきた光子の到達時間を計算した。POF中の光子の軌跡により到達時間が変化すると考えられるからである。この到達時間から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16** 計算によって求めたPMTの立ち上がり時間 分布

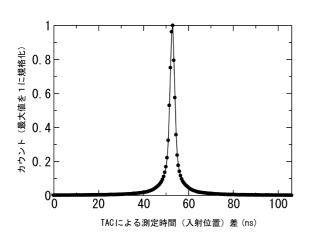


図17 計算によって求めたPMTの立ち上がり時間 分布から求めたTACによる時間差分布

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。

### 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

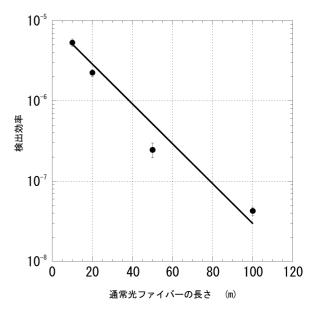


図18 検出効率と通常光ファイバー長の関係

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 1 mm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 る、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10<sup>12-13</sup>n/cm², 線で10<sup>3-4</sup>Gy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10<sup>16</sup>n/cm², 線では10<sup>6</sup>Gy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一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。

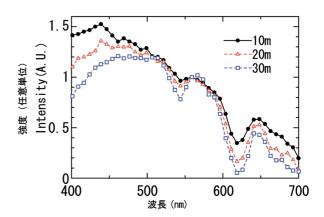


図19 10m, 20m, 30mの位置に 線を照射した 場合に分光器で観測した発光スペクトル

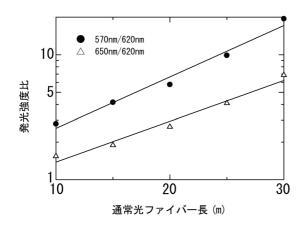


図20 吸収の著しい波長とあまり吸収されない波長 の発光強度比とファイバー長の関係

### 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10<sup>12-13</sup>n/cm², 線では10<sup>3-4</sup>Gy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NPOF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,光ファイバ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: 光ファイパーを用いた原子炉内中性 子束分布測定法の開発 治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).