

論文

15m長シンチレーションファイバーを用いた線量分布の オンライン評価

納富昭弘*、杉浦紳之*、伊藤哲夫*、鳥居建男**

On-line evaluation of spatial dose-distribution by using a 15m-long plastic scintillation-fiber detector

Akihiro Nohtomi*, Nobuyuki Sugiura*, Tetsuo Itoh*, Tatsuo Torii**

Abstract

A 15m-long plastic scintillation fiber (PSF) detector has been applied to the on-line evaluation of spatial dose-distribution inside radiation facilities. The aim of this study is to realize the real-time measurement system which is not only simple but also reliable for monitoring use. Determination of radiation-incident points was made by the measurement of time difference that two directional signals of the scintillation light reach both ends of the PSF [so called "time-of-flight (TOF) method"]. The PSF used had practically enough sensitivity to detect both fast neutrons and gamma-rays.

Keywords : plastic-scintillation fiber detector, position sensing, dose distribution measurement, neutrons, gamma-rays

* 近畿大学原子力研究所 Kinki University Atomic Energy Research Institute

** 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

この論文は、2008 IEEE Nuclear Science Symposiumでポスター発表した内容に、加筆し和文としてまとめなおしたものである。

1. はじめに

検出有効領域の長いプラスチックシンチレーション・ファイバー (PSF) 検出器は、線量分布測定への応用に関して、魅力的なデバイスである。その位置検出原理は飛行時間法にもとづくシンプルなものなので、通常、システムを構築しやすい上に信頼性が高い。この観点から、これまでいくつかの開発研究が試みられてきている。Soramato 等は 2.52m の PSF 検出器を、東京大学の研究用原子炉「弥生」から得られる高速中性子の測定に応用した [1]。また、彼らは PSF と通常の光ファイバーを組み合わせることによって、より遠隔に位置する放射線場での使用が可能であることを示した。Emoto 等は同様のシステムを原子力施設における放射線管理に適用すると有用であることを指摘した [2]。5m の長さの PSF 検出器を用いた場合に得られた γ 線の計数率分布は、サーベイメータで各位置で測定された結果とよく一致していた。

長い PSF 検出器の使用は、実用的には検出した信号の波高が検出器内を伝播する間に減衰するということによって制限される。この波高の減衰により検出効率が下がると同時に、位置分解能が著しく劣化する。本研究では、これまで実用化された中ではもっとも長いと考えられる 15m 長の PSF 検出器を用いて、この手法の中性子・ γ 線混合場における線量分布測定への応用の可能性について検討する。

2. 実験

放射線の入射位置検出には飛行時間法を用いた。すなわち、放射線の入射位置から両端に配置した光電子増倍管まで信号が到達するまでの時間差をもとに位置を評価した。この測定のプロットを Fig.1 に示す。高速応答の光電子増倍管の出力信号は、ホトマルアンプ (PM Amp) とコンスタントフラクショ

ン・ディスクリミネータ (CFD) を通過した後、時間波高変換器 (TAC) に入力されて両者の時間差に比例した電圧信号が生成される。この電圧信号の波高分布を PC ベースのマルチチャンネルアナライザ (MCA) で記録する。使用した 15m 長の PSF は、検出感度を高めるために 1mm 径のものを 10 本バンドルしたものである。

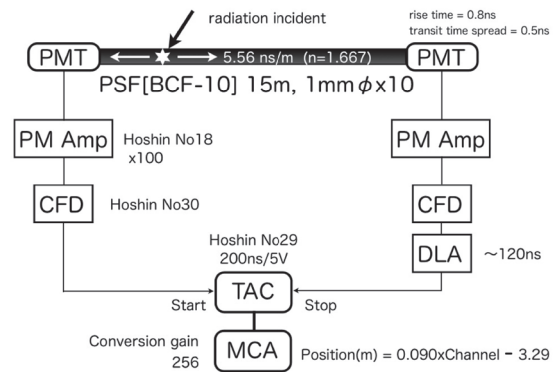


Fig. 1. Schematic drawing of data acquisition system for the PSF system

基本的な位置検出特性は、標準線源を用いて評価した。使用したのは、約 3MBq の ^{252}Cf から得られる中性子及び γ 線と、約 0.7MBq の ^{137}Cs から得られる 662keV の γ 線である。線源の位置を変化させながら、位置分解能と位置に対する線形性を調べた。また、異なる線源位置に対する波高分布の違いについての観測も行った。特に線源を用いずに長時間 (数日間) のバックグラウンド測定をすることにより、システムの安定性と検出効率の一様性を確認した。また、中性子と γ 線に対する固有検出効率を評価する目的のために、NE-213 検出器を使用した。

近畿大学研究用原子炉 UTR-KINKI の炉室でシステムのパフォーマンス検証を行った。中性子・ γ 線混合場で得られた計数率分布は、サーベイメータ (空気電離箱とレムカウンター) の直読み値と比較された。

3. 結果と議論

A. 位置分解能と線形性

^{137}Cs 線源を用いて得られた位置スペクトルを Fig.2 に示す。この線源の実効的な線源領域の大きさは直径 5mm 以下である。線源は特にコリメータを用いることなく、PSF の表面に配置された。Fig.3 には線源位置と得られたピークチャンネルとの間の線形性を示す。

Fig.2 の結果から、位置分解能は半値幅で、PSF の中央部で 60cm 程度、端の部分で 75cm 程度となっている。また、Fig.3 から明らかなように、15m 長の全体にわたって、位置読み出しの線形性は良好に保たれていることが分かる。

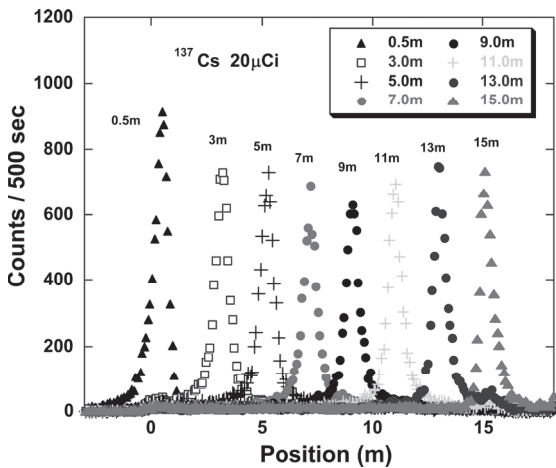


Fig. 2. Position (TAC output) spectra for ^{137}Cs gamma-rays.

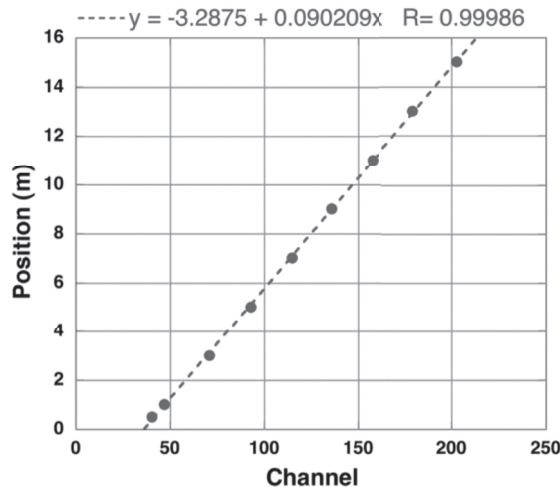


Fig. 3. Linearity between source position and peak channel for ^{137}Cs gamma-rays.

B. 波高の減少

^{252}Cf の位置を変えながら、片側の光電子増倍管の出力信号波高分布を測定した。Fig.4 に示されているように、線源位置を 0.2m から 15m に変化した際に著しい波高の減少が確認された。この時、各スペクトルの計数積分値は約 1/100 の位置まで低下した。

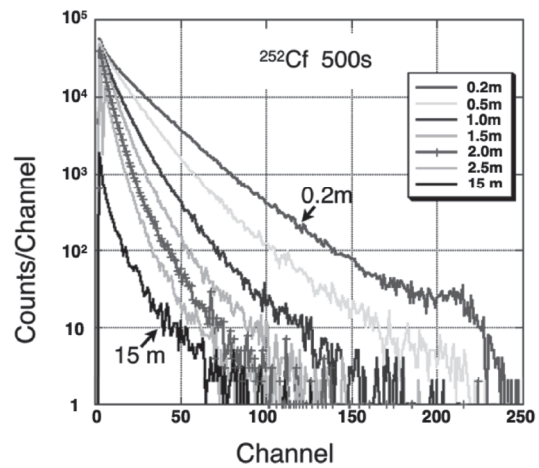


Fig. 4. Pulse height spectra of one-side PMT output signals for a ^{252}Cf source. The length indicated in unit of [m] is distance from the irradiation position to the PMT used.

C. 検出効率の一様性

PSF の長さ方向に沿った検出効率の一様性を検証するために、バックグラウンド測定をおこなった。2～3 日間の連続測定を、設定を変えながら数回繰り返した。結果を Fig.5 に示す。両端のディスクリレベルをともに 200mV 相当にした場合には、明らかな傾きが観測された。片側のディスクリレベルを 150mV に変更することにより、幾分理想的な一様性が実現された。この場合にも、50～60 チャンネル付近に取り除くことができない複雑な形状が残っているが、この部分では PSF 検出器自身が何らかの破損を受けているものと考えられる。

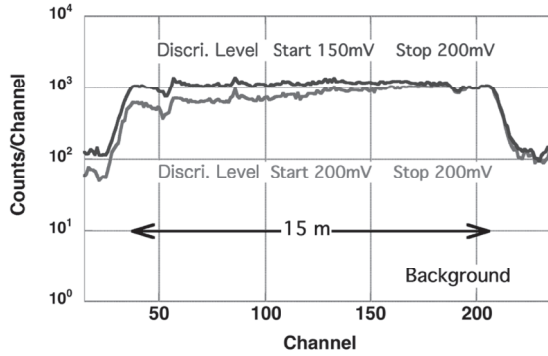


Fig. 5. Background spectra for the examination of PSF detection uniformity

D. 中性子と γ 線に対する固有検出効率の評価

Fig.6 に示すように、 ^{252}Cf に対しても Fig.2 に示した ^{137}Cs の場合とほぼ同様の位置検出特性が観測された。この場合、中性子と γ 線の両方が照射されていることになる。そこで、以下のような方法で、中性子と γ 線に対する PSF の固有検出効率を評価することを試みた。まず、 ^{252}Cf の放射能を $A_1(\text{Bq})$ とする。 ^{252}Cf の自発核分裂に伴い、1Bq あたり一秒間に 0.116 個の中性子が放出される [3]。一方、 ^{252}Cf から放出された γ 線が線源容器の外まで出てくるかどうかは、それぞれの線源の遮蔽構造に強く依存しており、一般的によく分かっていない。そこで、この actual emission rate (y) を調べるために、NE-213 液体シンチレーション検出器を用いて中性子線と γ 線を分離して測定した。この場合、中性子線と γ 線の計数率 ($N_n^{\text{NE-213}}$ と $N_\gamma^{\text{NE-213}}$) は、Fig.7(a) に示すような幾何学的配置において、パルス波形弁別方法により別々に評価される (Fig.8)。中性子線と γ 線に対する固有検出効率を ε_n 及び ε_γ とおくとすると、以下の式が得られる。

$$A_1 \times 0.116 \times \frac{\Omega_1}{4\pi} \times G_{\text{NE-213}} \times \varepsilon_n = N_n^{\text{NE-213}} \quad (1),$$

$$A_1 \times \gamma \times \frac{\Omega_1}{4\pi} \times G_{\text{NE-213}} \times \varepsilon_\gamma = N_\gamma^{\text{NE-213}} \quad (2),$$

ここに、 y は γ 線の actual emission rate、 Ω_1 は線源に対して NE-213 検出器が張る立体角、 $G_{\text{NE-213}}$ は使用した検出器の幾何学的形状に関連した定数であ

る。

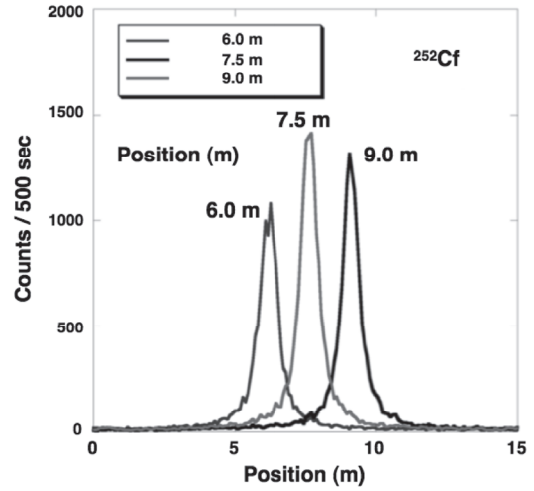


Fig. 6. Position (TAC output) spectra for a ^{252}Cf source.

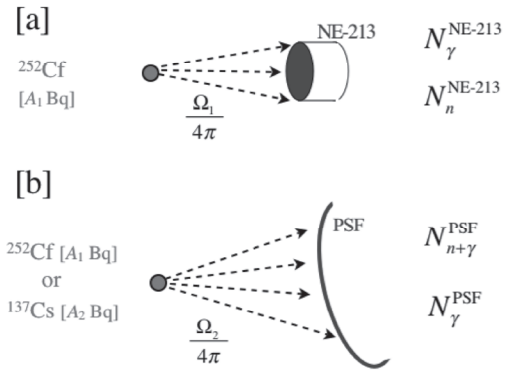


Fig. 7. Configurations of irradiation to [a] NE-213 detector and [b] PSF detector by checking sources.

次に、Fig.7(b) に示すように、同じ ^{252}Cf 線源を PSF 検出器で測定する。NE-213 と PSF 検出器はどちらも有機シンチレータであり、主に水素と炭素でできているので、PSF 検出器の ε_n 及び ε_γ が NE-213 のものとはほぼ等しいと見なすことができるとすると、以下の式が成り立つ。

$$A_1 \times G_{\text{PSF}} \times [0.116\varepsilon_n + \gamma\varepsilon_\gamma] \times \frac{\Omega_2}{4\pi} = N_{n+\gamma}^{\text{PSF}} \quad (3),$$

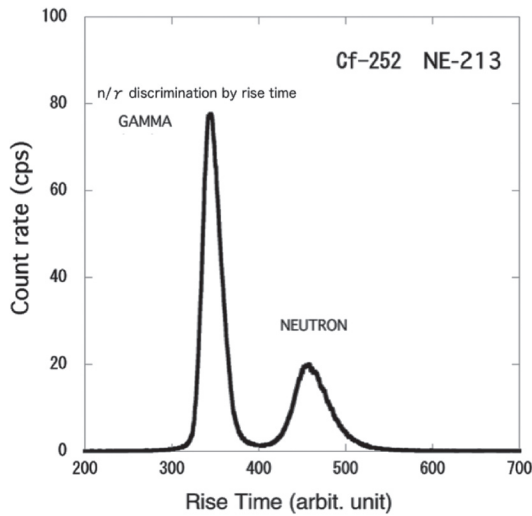


Fig. 8. Rise time spectrum for a ²⁵²Cf source measured by an NE-213 detector.

ここに、 $N_{n+\gamma}^{PSF}$ は PSF 検出器における中性子線と γ 線の総計数率、 Ω_2 は PSF 検出器が線源に対して張る立体角、 G_{PSF} は使用した PSF 検出器の幾何学的形状に関連した定数である。上記の測定に付加して、同様の配置で A_2 (Bq) の ¹³⁷Cs からの γ 線のみを測った時に得られる計数率が N_{γ}^{PSF} だとする。この場合、662keV γ 線の yield は 0.95 である。以上より次の式が成り立つ。

$$A_1 \times 0.95 \times \frac{\Omega_2}{4\pi} \times G_{PSF} \times \epsilon_{\gamma} = N_{\gamma}^{PSF} \quad (4).$$

(1)~(4) の連立方程式を、実測計数率 N_n^{NE-213} 、 N_{γ}^{NE-213} 、 $N_{n+\gamma}^{PSF}$ および N_{γ}^{PSF} を用いて解くことにより、次の結果が得られる。

$$\frac{\epsilon_n}{\epsilon_{\gamma}} = 1.5 \quad \text{and} \quad y = 0.3 \quad (5).$$

以上のような非常に粗い解析の結果、使用している PSF 検出器の中性子線と γ 線に対する固有検出効率率はほぼ同等であり、どちらかという γ 線に対してよりも中性子線に対しての方が幾分高いということが分かった。

E. PSF の長さ と 位置分解能 の 関係

Fig.9 には、今までに報告されている PSF 検出

器の位置分解能 [1,2] と、本研究で得られたそれとを比較して示してある。この図では、PSF 検出器の中央付近で得られる半値幅で表した位置分解能を検出器の全長の関数としてプロットしてある。その結果、PSF の長さが増すにつれて位置分解能が劣化する傾向が明らかである。これは、放射線入射により生じた発光の信号が、ファイバー中を伝播するにつれて減少することが原因であろう。この場合、最終的に位置分解能は使用する光電子増倍管の応答時間特性によって支配され、その中でも "transit time spread (TTS)" がもっとも影響が大きいと考えられる [3]。

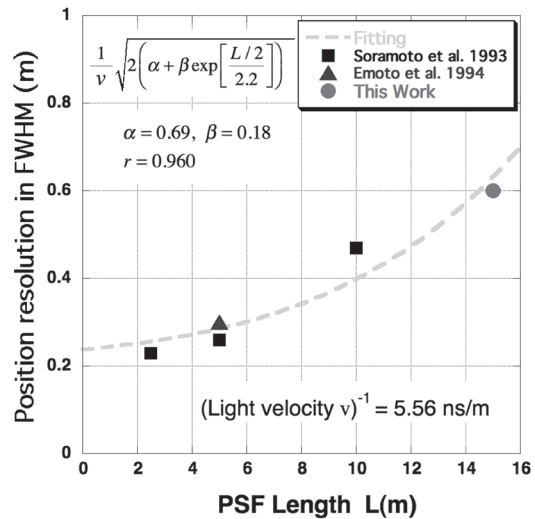


Fig. 9. Position resolution for different length PSFs.

使用する PSF 検出器の長さとその位置検出特性にどのような影響を与えるかについては、光電子増倍管の応答時間特性の観点から以下の様な説明ができる。すなわち、使用する光電子増倍管の "transit time spread (TTS)" は、主として次の三つの因子から構成されていると見なすことができる。

[A] 光陰極表面付近に生成された光電子の初期速度のばらつきに起因する成分 $\sim T_A$

[B] 光陰極から第一ダイノードに到達する経路のばらつきに起因する成分 $\sim T_B$

[C] ひとつの事象ごとに光電陰極で生成される光電子数のばらつきに起因する成分 $\sim T_C$

これら三つの因子の中で、[C] のみが光電子数に関連しており、それは放射線の入射位置が読み出しの光電子増倍管から遠く離れていればいるほど、伝播中の光の減衰に伴い小さくなる。この場合、光電子増倍管に到達する光により生成される光電子数は単純に以下のように記述することができる。

$$N = N_0 \exp\left[-\frac{x}{\lambda}\right] \quad (6)$$

ここに、 N_0 は放射線入射位置で PSF 内に生じた光子の数、 x は放射線入射位置から光電子増倍管までの距離、 λ は使用した PSF の減衰長（今の場合は $\lambda = 2.2$ m）である。今、実際の状況において発生する N の平均的な値を見積もる為に、 x の値として PSF の全長 L の半分の長さを想定する。transit time の相対的な広がり、ひとつの事象あたりに生成される光電子数の平方根の逆数に応じて変化するので次の様に書ける [3]。

$$T_c \propto \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{N_0 \exp\left[-\frac{L/2}{\lambda}\right]}} \quad (7).$$

したがって、単一の光電子増倍管による読み出しに関しては、

$$TTS_{\text{single}} = \sqrt{T_A^2 + T_B^2 + T_C^2} = \sqrt{\alpha + \frac{\beta}{\exp\left[-\frac{L/2}{\lambda}\right]}} \quad (8),$$

であり、二つの光電子増倍管の読み出しに基づく位置検出に関しては、

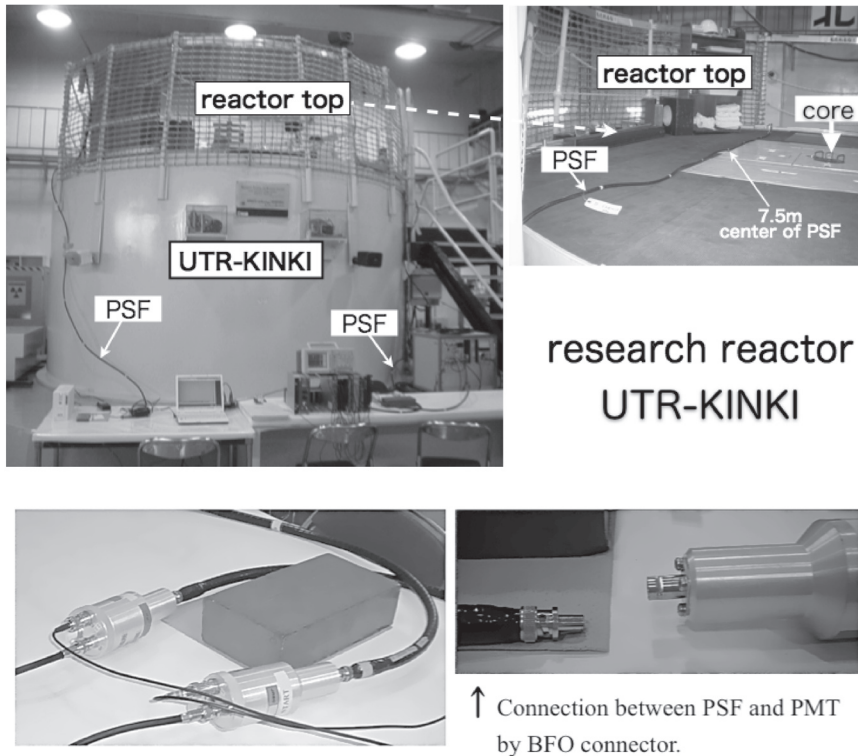
$$TTS_{\text{double}} = \sqrt{2} \times TTS_{\text{single}} = \sqrt{2\left(\alpha + \beta \exp\left[-\frac{L/2}{\lambda}\right]\right)} \quad (9),$$

となる。ここで、 α と β は定数である。最終的に、本研究の場合の位置分解能は次式で表現できると考えられる。

$$\text{Position Resolution} \propto \frac{TTS_{\text{double}}}{\text{Light Propagation Velocity } \nu} \quad (10),$$

$$= \frac{1}{\nu} \sqrt{2\left(\alpha + \beta \exp\left[-\frac{L/2}{\lambda}\right]\right)}$$

ここで、 ν は PSF 内での光の伝播速度（今の場合、 $1/\nu = 5.56$ [ns/m]）である。測定データを(10)式で最小自乗法によりフィッティングした結果を Fig.9 内に波線で示してある。



F. 研究用原子炉施設におけるパフォーマンス検証

開発したシステムのパフォーマンスを、近畿大学原子炉 "UTR-KINKI" の炉室内で検証した [4]。この研究用原子炉の最大熱出力は 1 W である。PSF 検出器は原子炉炉心周辺に Fig.10 に示すように設置した。原子炉の出力を 0.2 mW、0.1 W、1 W で運転して、計数率分布を測定した。測定時間はそれぞれ 600 sec とした。ただし、バックグラウンドの測定のみ、およそ一晩をかけて行った。Fig.11 に示してある結果の様に、各点で得られる計数率は原子炉の運転出力にほぼ比例していた。さらに、PSF 検出器に沿った計数率分布は、近似的に各点でサーベイメータで測定した総線量率に比例することが確認された。この結果は、今回開発した検出システムが、原子炉運転中の炉室内空間線量率分布時間変化の簡便なチェックに使用可能であることを示しており、その場合、電離箱やレムカウンターを用いてそれぞれの点で測定を繰り返す従来の方法に比べて、大幅な省力化が達成されることが期待される。

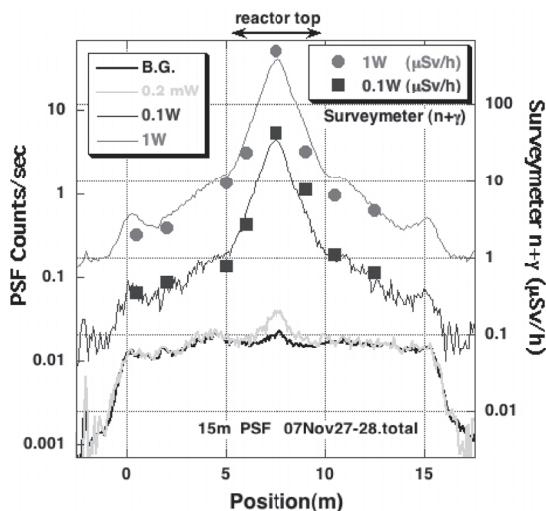


Fig. 11. Count-rate distributions in the reactor room of UTR-KINKI measured by the PSF detector.

4. まとめ

本研究において、15m 長の PSF 検出器を利用したシステムを開発し、低出力の研究用原子炉炉室内

の空間線量分布測定に応用することを試みた。その結果、開発したシステムは中性子・ γ 線混合場における線量分布オンラインモニタリングに対して充分適用可能であり、その場合従来の手法に比べて大幅な省力化が実現できるだけでなく、その信頼性に関しても利点があるということが見いだされた。このシステムを、より詳細な線量評価システムとするには、何らかの形で中性子成分と γ 線成分の寄与を分離する手法を確立することが必要である。

今回開発したシステムは、放射性同位元素を診断目的で日常的に使用する医療放射線施設のモニタリングにも応用できるであろう。例えば、PET 診断施設の検査室内では測定対象の放射線が 511 keV の消滅 γ 線のみに限られるという特殊な事情があるので、より直接的な吸収線量の評価が可能となるであろう。

今回の測定結果から、実用的に許容できる PSF 検出器の長さは、最長で 15 m 程度であろうという知見が得られた。これよりも長くなると、著しい光信号の減少により、後段の信号処理に避けることのできない困難をもたらすことになるからである。この手法による位置分解能は、マルチチャンネルプレート内蔵光電子増倍管の様なタイミング特性の優れた光検出器を採用することにより大幅に改善される可能性があり、更に応用の幅が増すことが期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、PSF を提供して頂いた JAEA のもんじゅ開発部に感謝いたします。また、NE-213 シンチレーション検出器による測定に関してお手伝い頂いた東京大学の鈴木ちひろさんにお礼を申し上げます。この研究の一部は (株) 千代田テクノロおよび (株) ア・アトムテクノロ近大との共同研究によりなされたものです。

参考文献

- [1] S. Soramoto et al. : "A study of distributed raditation sensing method using plastic scintillation fiber" , KEK Proceedings 93-8 RADIATION DETECTORS AND THEIR USES, pp.171-173 (1993)
- [2] T. Emoto et al. : "Measurement of spatial dose-rate distribution using a position sensitive detector", KEK Proceedings, 94-7 RADIATION DETECTORS AND THEIR USES, pp.119-125 (1994)
- [3] G. F. Knoll "Radiation Detection and Measurement (THIRD EDITION)", John Wiley & Sons, Inc. (1999)
- [4] Kinki University, Atomic Energy Research Institute <http://kuaeri.ned.kindai.ac.jp/>