位置検出型ファイバーエリアモニタの開発

高田 千恵^{*1}, 齋 藤 圭^{*1,*2}, 橋 本 周^{*1}

(2003 年 8 月 25 日受理)

(2003 年 9 月 4 日再受理)

Development of the Position Detectable Fiber Areamonitor

Chie TAKADA^{*1}, Kei SAITO^{*1,*2} and Makoto HASHIMOTO^{*1}

KEY WORDS: position detectable fiber areamonitor, multichannel analyzer, multichannel ratemeter, MCRM, plastic scintillation fiber

I 緒 論

光ファイバーをシンチレーションタイプの放射線検出器兼シンチレーション光の伝送路として使用し、飛行時間法（以下、「TOF 法」という）との組み合わせにより、一次元での放射線入射位置検出を行う手法は、近年多くの研究者により研究が進められてきた。この手法に関しては、ファイバー検出器の長尺化、検出効率の向上、位置分解能の向上、分析位置情報の多次元化等を目指し、ファイバーの材料・構造、分析手法の改良等、様々な方向から改良が検討されている¹⁻³⁾等。

大洗工学センターでは、プラスチックシンチレーションファイバー（以下、「PSF」という）を用いた位置検出型ファイバーエリアモニタの開発を進めてきたが、今回、管理区域内でのエリアモニタリング、例えば放射性廃棄物処理系統等の放射線の時間変動をモニタリングす

る際に重要となる、線量分布の経時変動の正確な観測を目的とした改良に着手した。一般的に TOF 法では時間分析結果をマルチチャンネル波高分析器（Multichannel Analyzer, 以下、「MCA」という）でスペクトル処理させる。ファイバー式分布測定手法では、MCA で表示された横軸（チャンネル）を、放射線を検出した位置と読み替えて観測するが、検出部に入射した放射線の量に依存する計数値に関しては時間積分値しか表示されず、時間追従性に劣る（Fig. 1）。そこで、この問題の解決のために、マルチチャンネル波高分析レートメータ（Multichannel Ratemeter, MCRM）と名づけたシステムの開発を行っている。

本稿は、試作段階の MCRM を、既存の PSF 検出器に適用し、ファイバーエリアモニタとしてより実用的な適用を図るための検討経過報告である。

II 原理及び試作

1. ファイバーによる位置検出測定の原理

本研究で使用した位置検出測定の原理を以下に述べる。また、測定システムのブロック図を Fig. 2 に示す。

放射線がファイバーに入射すると、その部位でシンチレーション光が発生する。そのシンチレーション光は、ファイバー内を伝播し、両端に到達する。両端に到達した信号は、時間波高分析器（TAC）でその時間差を計測し、波高値（電圧値）に変換して出力する。TAC の出力

^{*1}核燃料サイクル開発機構大洗工学センター安全管理部；茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002（〒311-1393）

Health and Safety Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute; 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan.

^{*2}現在（出向中）：文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課放射線規制室；東京都千代田区霞ヶ関 1-3-2（〒100-8966）Office of Radiation Regulation, Nuclear Safety Division, Science and Technology Policy Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology; 1-3-2 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8966, Japan.

を MCA に入力する。

MCA では入力されるパルス数が波高（電圧）別にカウントされる。本測定システムに適用した場合、電圧値は両端に到達した信号の時間差に対応するので、各位置における入射放射線の量が表示される。これが、線量の位置分布を表す情報となる。

2. MCRM の試作

MCA は、測定時間内に入力された波高値の分析結果をチャンネル毎に積算して表示する。この場合、測定時間未満の期間で発生した変動は、測定時間で平均化され

Fig. 1 An example display in monitoring of a radiation-varied area.

てしまうため、感度良く検知することができない。そこで、しばしば計数率を逐次表示させるために単一チャンネルに用いられる計数率処理手法を、多チャンネルに適用することを試みた。これが、MCRM である。MCA は、入力されたアナログ信号の振幅を測定し、その値をデジタル数値に変換する ADC（アナログ・デジタル変換器）、ヒストグラムメモリ及びメモリに記録されたヒストグラムを表示するためのディスプレイ等を基本構成とする。

今回、MCRM の試作にあたっては、ヒストグラムメモリの前段に計数率処理回路を追加する方法と、ヒストグラムメモリから取得した情報をもとにパソコンで計数率処理をする方法の二通りが想定された。検討の結果、現状は試作段階であるため、カスタマイズの利便性に勝る後者の方法で、前者のような計数率処理回路で行う処理を実現することとした。したがって、試作機に含まれる MCA ハードウェアとパソコンのインターフェイス部は既存の市販品である。

3. 試作 MCRM の原理

計数率の求め方にはいくつかの方法があるが、今回はアナログレートメータの基本型である CR 並列積分回路（Fig. 3, 以下、「回路」という）による計数率計を参考に

Fig. 2 Block diagram of the position detectable system.

Fig. 3 Ratemeter circuit (CR-integration type).

した^{4,5)}。この場合、個々の計数に対応した一定波形のパルスを回路に入力して得られる出力電圧が指示値となり、コンデンサの静電容量 (C) と抵抗値 (R) の積が時定数となる。

測定開始から十分な時間 (時定数の数倍以上) が経過した状態において、計数率に相当する出力電圧は以下のように求められる。ある時刻 t と $t+dt$ の間の時間 dt に計数率 n (パルス・sec⁻¹) により与えられるコンデンサの電荷 Q の変化率は、この時間内の計数により新たに得られる電荷 nq と、抵抗を通して放電される電荷の差であることから、(1)式で表される。

$$\frac{dQ}{dt} = nq - \frac{Q}{RC} \quad (1)$$

(1)式を初期条件 $Q(0)=0$ として解くと、

$$Q(t) = nqRC(1 - e^{-t/RC}) \quad (2)$$

となる。電圧は、コンデンサの電荷と容量の比であることから、(2)式を回路の出力電圧で表すと、

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C} = nqR(1 - e^{-t/RC}) \quad (3)$$

となる。また、この時点で得られた出力電圧への寄与分は、時間とともに指数関数で減少し、 t_0 時間後の寄与は、時刻 t での値に $\exp[-(t_0-t)/RC]$ を乗じた値となる。

計数率計の表示値は、過去の計数が与える寄与と、(3)式で表される最新の計数による値の和である。誤差の少ない安定した表示値を得ること、また、生じた変化を的確に捉えること、これら両者を実現するためには、過去の計数が与える寄与の大きさは、過去から現在に至る計数の値や変動状況を十分考慮して決定されなければならない。しかし本研究では、多チャンネルでの並行処理を確実にを行うため、過去の計数の寄与に係る処理を簡素化し、表示更新ごとに前回の表示値のみを考慮することとした。

従って、MCRM における、ある時刻 k における i 番目のチャンネルの表示計数率 N_{ik} は、(4)式となる。(なお、以後、添字の i 及び k は全て同様の意を持つものと

する。)

$$N_{ik} = N_{i(k-1)} \cdot e^{-\Delta t/\tau_{ik}} + n_{ik} \cdot (1 - e^{-\Delta t/\tau_{ik}}) \quad (4)$$

ここで、 Δt は予め設定した表示更新周期、 n は直近の Δt 時間に新たに取得した計数値、 τ は時定数である。なお、 Δt 、 τ と先に論じた RC の関係は (5)式で表すことができる。

$$\Delta t \ll \tau = RC \quad (5)$$

時定数 τ が長いと回路の出力電圧は安定するが、計数率の変化に対する即時応答性は悪化する。このように、時定数 τ の値は、的確な計数率出力を得るために重要な要素となるので、固定値として設定するほか、(6)式によって算出した値をその都度適用できるようにもする。

$$\tau_{ik} = \frac{n_{ik}}{2\sigma_{ik}^2} \quad (6)$$

計数値の標準偏差 σ の n に対する割合、すなわち相対標準偏差 S を用いると、(6)式は (7)式のように表すことができる。

$$\tau_{ik} = \frac{1}{2n_{ik}S^2} \quad (7)$$

S を一定に設定することで、計数率が低い場合には長い時定数による処理で変動の少ない出力を、また、高い計数率の場合には短い時定数による処理で速い応答を得て、いずれの場合でも同程度の信頼性を有する的確な計数率出力を得ることができる。

III 評価試験

MCRM の試作器を用いて経時変動監視機能の確認のほか、線量分布測定に係る基礎データとしてエネルギー特性、位置分解能、計数効率及び線量率範囲についての試験を行っている。現時点では試験データ数が十分でないため、詳細な結果は後報としたい。

1. 使用器材

実験系は、試験の利便性を主眼において決定した。実験に使用した器材を **Table 1** に示す。PSF は、蛍光剤非混合のプラチッククリアファイバー、石英ファイバー等 に比べ長尺での利用には不向きであるが、容易に入手可能で、発光効率にも優れていることから、選定した。同様に計数効率向上のため、PSF は太目の 1 mm ϕ のものを 19 本束ねたものを使用した。この 19 本という結束本数は既存の光電子増倍管 (PMT) との結合面から決定したものである。

2. 試験方法

上記実験系を **Fig. 1** に示すように接続し、その MCA と MCRM プログラムの入ったパソコンを接続し、その

Table 1 Instruments for this examination.

Instruments	Manufacturer and type
Fiber Detector Harness (Plastic Scintillation Fiber)	JREC (Custom Made) fiber: BICRON BCF-10 5 m×1 mm ϕ ×19
Photomultiplier Tube	Hamamatsu Photonics R1635 (Head-on type 10 mm ϕ)
Fast-Timing Preamplifier	ORTEC VT120
High-Voltage Power Supply	ORTEC 660 etc. (service voltage; 1,250 V)
Preamplifier Power Supply	ORTEC 4002P etc.
Constant-Fraction Discriminator	ORTEC 584
Time-to Amplitude Converter	ORTEC 567 (TAC/SCA) or 566 (TAC)
ADCAM Multichannel Buffer	ORTEC 926 etc.
NIM Bin and Power Supply	ORTEC 4001A/4002D
Personal Computer for MCRM	IBM ThinkPad X24 with Ultra-base

Fig. 4 Design of monitoring system for experiment.

出力から、経時変動監視機能の確認を行った。この試験では、表示更新周期 Δt は 2 秒とし、時定数 τ は 10 秒固定とした。相対誤差指定による処理はパソコンの処理の負担となるため、この段階では実施していない。

数種の強度をもった ^{137}Cs 線源 (0.3~1 MBq, 外形 25 mm ϕ ×3 mm) からの γ 線を鉛ブロックでコリメートして PSF に照射する。試験では、PSF をその長さ方向に動かすことにより、照射部位の移動を模擬した。**Fig. 4** は試験の様子を撮影したものである。PSF 照射部位の移動速度は 1 m/min 程度、移動方向は STOP 信号側から START 信号側 (表示画面の左から右)、MCRM のチャンネル数は 512 ch とした。

Fig. 5 Shifting image of MCRM display.

IV 結果及び考察

上記のピーク位置移動確認試験における MCRM の出力画面を **Fig. 5** に示す。MCRM はアニメーションのように随時表示がかわっていくものであるため、**Fig. 5** では便宜的に等時間間隔での表示データを時系列的に 3 次元表示した。なお、本稿までの試験は移動観測実現の可能性を確認するための試験であり、定量的な評価は行っていないため、スケールの単位は任意とした。

MCRM 画面において、ピーク位置が徐々に動く様子を確認することができた。しかし、分布変化速度の測定対象状況に対する時定数及び表示更新周期のカスタマイズが未実施の状態での試験であったため、スペクトルのピーク波形が左右対称ではなく、線源が移動してきた方向 (左側) の測定結果の影響を受け、あたかも 2 つピークがあるように表示されている。

V 結 論

ファイバーを使用した線量率分布測定システムの処理に、従来の MCA にかわり MCRM を適用することで、線量分布が時間の経過とともに変動する場でのエリアモ

ニタリングの精度向上の可能性を確認することができた。

今後は、検出部、測定部及び処理部を総合したシステムとして、測定対象の変化状況、特に、放射性物質の移動や減衰等に対する追従性に関する性能試験を行い、必要に応じて改良を進める予定である。また、線量率換算アルゴリズム、スペクトルアンフォールディングの追加のための検討は、より精度の高い線量率分布状況モニタリングのために必要不可欠である。さらに、中性子、高エネルギー β 線等の混在場での弁別手法にも目を向ける他、加速器施設のビームロスモニタ等他方面への応用も検討していきたい。

参 考 文 献

- 1) S. SORAMOTO, M. NOTANI, Y. FUKANO, S. IMAI, T. IGUCHI and M. NAKAZAWA; A Study of distributed radiation sensing method using plastic scintillation fiber, *KEK Proc.*, **93**(8), 171-173 (1993).
- 2) 江本武彦, 鳥居建男, 野崎達夫, 安藤秀樹; 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, **21**(3), 49-58 (1995).
- 3) 三菱電機株式会社; 光ファイバ放射線センシングシステム—直線型検出器ケーブル (商品カタログ) (1999).
- 4) G.F. KNOLL; 計数率計, 木村逸郎, 阪井英次 (訳) “放射線計測ハンドブック 第3版”, pp. 708-711 (2001), 日刊工業新聞社, 東京.
- 5) N. TSOUFANIDIS; 計数率計, 阪井英次 (訳) “放射線計測の理論と演習 上巻基礎編”, pp. 322-323 (1993), 現代工学社, 東京.

高田 千恵 (たかだ ちえ)

新潟県生まれ。平成6年動燃事業団 (現・サイクル機構) 入社。核燃施設, RI 施設等の放射線管理業務を経て, 現在は, 所内の複数施設の放射線モニタリング情報を遠隔集中監視する計算機システムの構築・整備に係る業務等に従事。