

中性子線量モニタの研究

Study of neutron dosimeter

総合技術研究本部 環境計測技術グループ
Space environment measurement Group

松本晴久、寺沢 和洋、五家建夫

H. Matsumoto, K. Terasawa, T. Goka

Abstract

The scintillating fiber camera is a type of three-dimensional track detector. Using this camera, we can observe the scintillation track produced along the path of a charged particle, and from its scintillation yield can determine the linear energy transfer (LET) distribution of the charged particle. Such observations are also possible for recoil (charged) particles produced by fast neutrons. From these data, we can estimate the LET distribution of individual charged particles or that of recoil particles produced by neutrons; and finally, we can estimate the dose equivalent due to charged particles and/or fast neutrons. For use as a dosimeter for fast neutrons produced by the interaction between cosmic-ray particles and wall materials of a manned spaceship in space, a 52 mm cubic scintillating fiber camera with a 75 mm Φ gated-image intensifier with a maximum counting rate of 30 Hz was constructed. The dosimeter consists of a stack of scintillation fibers with a sensitive volume of 52 mm \times 52 mm \times 52 mm and a 75 mm diameter image intensifier for readout from the scintillation fibers. The scintillation yields were measured for high-energy heavy ions such as carbon and argon ions. An energy resolution of 12% full-width half-maximum (FWHM) was obtained for penetrated argon ions of 650 MeV/n. These results demonstrate that this type detector is very useful as a dosimeter for high-energy cosmic rays and their secondary neutrons.

1. はじめに

我々のグループでは、平成16年度に有人宇宙船内での高エネルギー中性子（数 MeV 以上）による線量を計測するためのシンチレータファイバカメラ型の3次元飛跡検出器を試作した。試作品は、52mm 立方のプラスチックシンチレータスタック、75mm ϕ イメージインテンシファイヤと CCD で構成した。中性子線量当量は、プラスチックシンチレーションファイバーの原子核と中性子が核反応を起こし、発生した反跳粒子による LET を計測することにより求める。これまでに炭素、アルゴン等の照射試験を通じて3次元飛跡検出器の計測方式の妥当性を確認した。発光量によるエネルギー分解能は、約12%（半値幅）で中性子の線量計測はもちろんのこと、重イオンなど荷電粒子の線量やエネルギー計測にも応用できる可能性を得た。本稿では、平成17年度に実施した照射試験解析結果について述べる。

2. 研究の概要

2.1 背景及び目的

宇宙船内部には、エネルギーの高い荷電粒子を主成分とする宇宙放射線が船壁構造材等の原子核と相互作用を起こして発生する二次中性子が存在する。この2次中性子は、宇宙船搭乗員の被ばく線量の20~30%以上^{1,2)}を占め、しかも熱中性子(0.025eV)から100MeVくらいの極めて幅広いエネルギー範囲に及ぶ。中性子は、人体内部の器官（造血臓器など）に到達し影響を与える可能性が大きいと考えられている。これまで、宇宙船内で行われたリアルタイム計測としては、JAXAのShuttle及びISSで行ったBonner球によるもの、ロシアのMIRステーションで行ったスチルベン結晶を使用したアンチ・コインシデンス法によるもの及びCsI結晶内での核反応を利用するものなど数少ない。特に、数MeV以上の中性子による線量当量を評価できる技術は、いまだに確立されていない。

T. W. Armstrong と B. L. Colborn がおこなった中性子のエネルギーに対する線量当量への寄与予測を Table 1 に示す。Table 1 から分かるように 10MeV 以上の寄与は 40~50% を占めており、被ばく管理上数 MeV 以上の中性子による線量を実測することが重要である。

Table 1 Contribution of neutrons by energy range radiation effects

Neutron energy range (MeV)	Electronics		Effects in tissue		
	Displacement damage in Si (%)	Displacement damage In GaAs (%)	Single-event effects (%)	Dose equivalent max depth (%)	Dose equivalent 10 mm depth (%)
<0.1	0	1	0	1	1
0.1-1	9	14	0	13	15
1-10	58	33	46	38	43
10-100	27	31	42	27	26
>100	6	22	11	22	15

2.2 センサ概要

目標としている中性子線量計測装置は、早稲田大学が開発したセンサをベース¹⁾にしておりシンチレーションファイバースタック1個と2個の75mmφイメージ・インテンシファイヤで構成する (Fig. 1 参照)。また、75mmφイメージ・インテンシファイヤ蛍光面での飛跡を4個のファイバータープ、CCDの組み合わせで読み取る。

1) シンチレーションファイバースタック

中性子線量計測装置は、0.25×0.25mmの断面積をもつシンチレーションファイバー (SCSF-78, Kuraray Co.) を200本並べたものを1層とし、それぞれをXZ方向YZ方向に互い違いに200層重ねたスタックとイメージ・インテンシファイヤを組み合わせ、中性子が入射した際の飛跡をXZ面、YZ面に接続したイメージ・インテンシファイヤで取得する。

2) イメージ・インテンシファイヤ

高感度・高分解度 (512×512ピクセル) で粒子の飛跡を観測するために大口径の75mmイメージ・インテンシファイヤを開発する。受光面のストレートファイバータープは、シンチレーションファイバースタックの発光波長を考慮し、SF047AS-13μm、電極蛍光面は、高速減衰のP46を採用する。また、イメージ・インテンシファイヤとシンチレーションファイバースタック間は、ストレートファイバータープを用いることにより荷電粒子に反応しないようする。MCPは、感度を上げるためChevronタイプを使用し、飛跡画像は、4個のCCDを用いて512×512ピクセルで取得する。

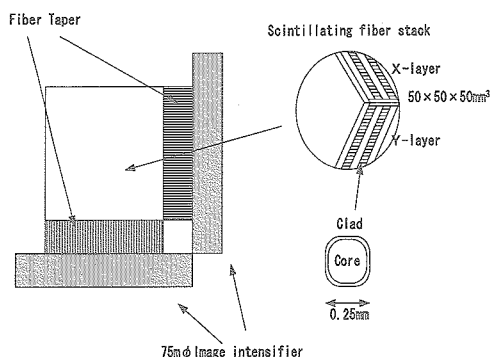


Fig.1 Final design of the neutron dosimetry system. The neutron dosimetry is a combination of a scintillating fiber stack, two image intensifier units.

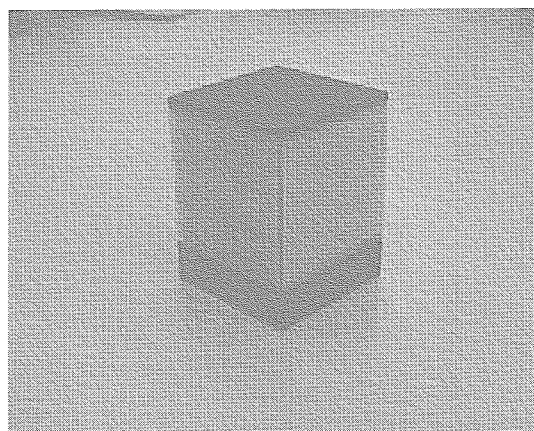


Fig.2 Photograph of the scintillating fiber stack.

2.3 照射試験結果

検出器の特性を確認するため荷電粒子による照射試験を実施した。75mmφイメージ・インテンシファイヤは、1台しか試作していないので、一方のイメージ・インテンシファイヤは、40mmφ (PII40HUQ/CCD-X, Hamamatsu Photonics Co.) で代用した。データ収集についても、75mmφイメージ・インテンシファイヤについては、PCI-7200 (デジタルパラレル I/O カード) を用いて、40mmφイメージ・インテンシファイヤについては、ビデオキャプチャーボードを用いて別々のパソコンで取得している。イベントトリガーは、最終的にはイメージインテンシファイヤ自身で実施する予定であるが、今回は PMT (R329, Hamamatsu Photonics Co.) を用いた。実験のセットアップを Fig. 3 に示す。検出器の特性を確認するため荷電粒子による照射試験を実施した。75mmφイメージ・インテンシファイヤは、1台しか試作していないので、一方のイメージ・インテンシファイヤは、40mmφ (PII40HUQ/CCD-X, Hamamatsu Photonics Co.) で代用した。データ収集についても、75mmφイメージ・インテンシファイヤについては、PCI-7200 (デジタルパラレル I/O カード) を用いて、40mmφイメージ・インテンシファイヤについては、ビデオキャプチャーボードを用いて別々のパソコンで取得している。イベントトリガーは、最終的にはイメージインテンシファイヤ自身で実施する予定であるが、今回は PMT (R329, Hamamatsu Photonics Co.) を用いた。75mmφイメージ・インテンシファイヤで取得した飛跡の例を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。Fig. 5 は、鉄粒子の飛跡の例で発光点はシンチレーションファイバーの断面 (0.25mm×0.25mm) に相当し、他のピクセルへのクロストークもなくブラッグピークもはっきりと見ることができる。Fig. 5 は、炭素粒子による飛跡でシンチレーションファイバースタック内での核反応を示すイベントである。以上の結果、3次元飛跡検出器として十分機能することが確認できた。

次に、同じ LET の値となるファイバーの発光値により、エネルギー分解能を確認した。Fig. 6 に示すとおりアルゴン粒子のエネルギー分解能は、半値幅で~12%となり良いエネルギー分解能を得ている。粒子と入射エネルギーにより LET は大きく異なることから最適なイメージインテンシファイヤの MCP 電圧を決める必要がある。MCP 電圧と発光量の関係を Fig. 7 に示す。MCP 電圧と発光量の関係は、比例関係にあり相対発光量は、(1)式のように表すことができた。

$$\text{Relative light yield} = k (V_{\text{mpc}} - V_{L0}) \dots \dots (1)$$

ここで、k は粒子の LET で任意に決まる値、 V_{mpc} は MCP 電圧、 V_{L0} は発光量が 0 となる電圧である。

シンチレーションファイバでのエネルギーロスは、相対論的速度領域にある電子・陽子の LET (0.2 keV/μm) から相対論的速度領域にある鉄粒子の LET (135 keV/μm) を目標としているので、鉄粒子/電子・陽子の比から 700 以上は必要となる。但し、クエンチング (消光) 現象により鉄 500MeV/nuc の LET (1870keV/μm) と炭素 430MeV/nuc の LET (10.7 keV/μm) の比が約 17.3 になるべきところが 2.8 と小さい結果となった。

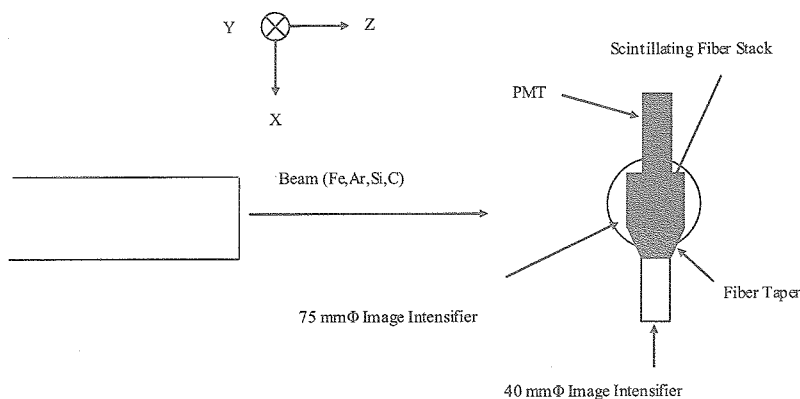


Fig. 3 Experimental Setup

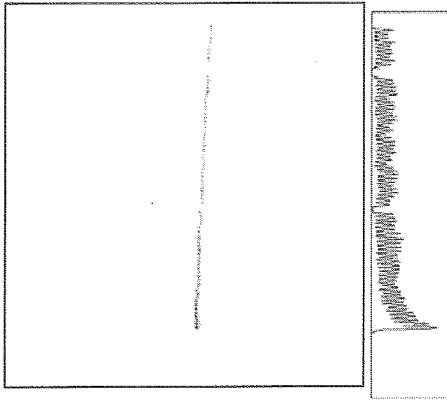


Fig.4 Iron-ion track with a clearly Bragg peak(left). 1D projectin of the image corresponds to the right right in the figure.

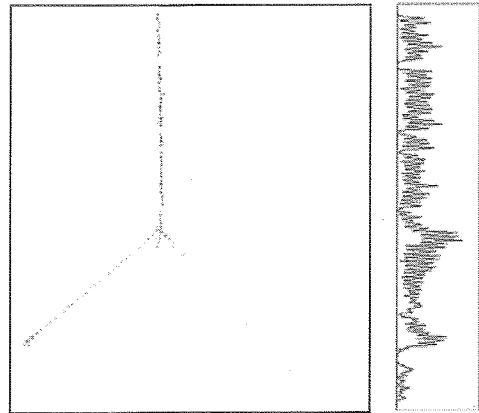


Fig.5 A carbon-ion observed by using rack with a clearly Bragg peak(left). 1D projectin of the image corresponds to the right right in the figure.

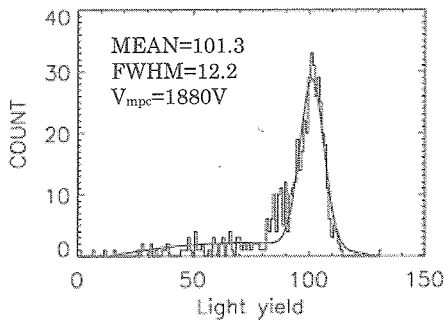


Fig.6 Deposit energy distribution wa obtained with a resolution of ~12%(FWHM) for an argon ion.

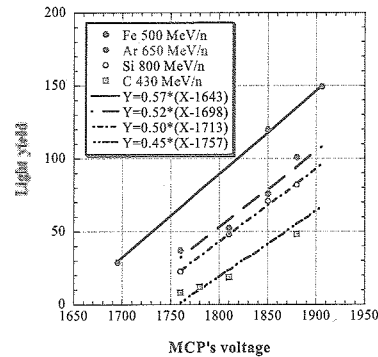


Fig.7 Relationship between light yield and MCP's voltage.

3. まとめ

陽子、窒素粒子、鉄粒子の照射試験を通じて 3次元飛跡検出器の計測原理を確認することができた。また、沈着エネルギーの分解能も、半値幅で約 12%以下で、中性子の線量計測はもちろんのこと荷電粒子の線量やエネルギー計測にも応用できる可能性を得た。

今後は、更に詳細な解析を行い MCP 電圧および発光量から、LET を算出する式を求める。また、他の粒子による照射試験を実施しクエンチング現象メカニズムを明らかにし、16 ビット ADC を用いた場合、LET 計測の範囲をどこまで拡大できる検討する。

謝辞

照射試験を支援して下さった放射線医学研究所内堀幸夫博士及びHIMACのスタッフの皆さんに感謝いたします。

参考文献

- 1)Terasawa, K., Doke, T., Hara, K., Hasebe, H., et al.:2001, A Small Scintillating Fiber Camera Consisting of 0.25 mmSquare Fibers for Space Dosimetry, IEEE Trans. Nucl. Sci., 48, 4, 1, 118-1,121