

## 宇宙環境計測装置の研究

*Study of Space Environment Measurement Equipment*

総合技術研究本部 環境計測技術グループ

*Expert group for space environment engineering*

松本晴久、寺沢 和洋、五家建夫

*H. Matsumoto, K. Terasawa, T. Goka*

### Abstract

The space environment which must be considered in the spacecraft design can be classified into five categories: vacuum, neutral gas, plasma, radiation, and micrometeoroid/orbital debris. The radiation is placed in it as the important environment because it has a large effect on the lifetime of the satellite and affects health of crewmember. We studied the measurement of light particles (electron, proton, helium) and neutron in the 2004 FY. This paper describes the study result of neutron dosimetry device.

#### 1. はじめに

我々のグループでは、軌道上の衛星及び宇宙飛行士に有害な影響を与える宇宙放射線を計測する装置の研究を行っている。また、これらの装置を衛星に搭載し衛星の信頼性向上に資するデータを取得するための開発も行っている。平成16年度は、軽粒子（電子、陽子、ヘリウム）と中性子計測の研究を行った。本報告書では、中性子線量計測装置の研究結果について述べる。

#### 2. 平成16年度の成果

##### 2.1 背景及び目的

月面有人活動など次期有人活動を展開するためには、宇宙飛行士の被ばく問題をどのようにクリアしていくかが重要であり、独自の有人活動を展開するとなると日本独自の計測技術、管理技術を持つ必要がある。宇宙船での放射線被ばくのかかなりの部分は、高エネルギー荷電粒子であるが、それらが宇宙船の線壁を通過する際、2次中性子を生成し、さらに被ばく線量を付加することになる。

宇宙で行われた有人宇宙船中での中性子線に対する実時間計測の実例は、JAXA（旧 NASDA）の Bonner 球によるもの（0.025eV～15MeV を計測）と、ロシアの MIR 衛星で使用され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、更には CsI 結晶内での核反応を利用するものの3例に過ぎない。4例目として ISS の JEM 曝露部に 10MeV～100MeV の太陽中性子を計測する装置が 2008 年打ち上げられる予定であるが、重量が約 40kg と重くインタフェース調整に苦労した。また、今まで、米国、ロシアを中心に 10MeV 以上の中性子計測の研究を行っているが、宇宙機搭載は実現されていない。

中性子によるものは、理論上は十数 % 程度と推測されているが、実測データが少ないため正確なことは明らかとなっていない。従って、宇宙船内等で中性子を正確に評価することは、線量計測上の重要な課題の一つである。

本研究の目的は、宇宙ステーション等に搭載可能な小型の装置（目標 5kg 以下）で、荷電粒子線や  $\gamma$  線から区別して、より確実に中性子（数 MeV 以上）のみの線量寄与を求めることのできる中性子線量装

置（3次元飛跡検出器）を開発することである。本装置は、早稲田大学が開発した装置<sup>1)</sup>をベースに以下の改良を加える。

- 1) シンチレーション・ファイバースタックとイメージ・インテンシファイヤ間で発生するイベントノイズの除去（クリアファイバー化）
- 2) 75mmφイメージ・インテンシファイヤの開発と軽量化（約10kgから約2kg）
- 4) 飛跡データ取得の高速化（30イベント・秒）

エネルギー範囲の上限は、一般に検出器の大きさによって決定されてしまうが、開発する装置は、中性子のエネルギー情報を必要としない（LETの計測）ため、線量計測上の上限は存在しない特徴をもつ。また、エネルギー下限をどこまで取得できるかが重要となる。

## 2.2 システム概要

中性子線量計測装置は、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個のファイバーテーパ、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、 $0.25 \times 0.25$ mm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（ $512 \times 512$ 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試作した。受光面のストレートファイバーテーパは、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- $13\mu\text{m}$ 、電極蛍光面は、高速減衰のP46を採用した。また、ストレートファイバーテーパを用いることにより早稲田大学が開発した装置での課題であるイベントノイズに対して、ストレートファイバーテーパを用いることにより荷電粒子に反応しないことを確認している。また、MCPには、感度を上げるためChevronタイプを使用している。飛跡画像は、4個のCCDを用いて $512 \times 512$ ピクセルで取得する。

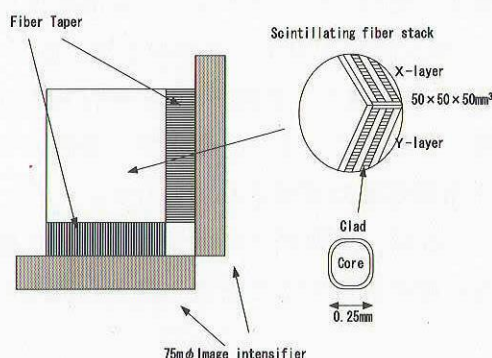


Fig.1 System of neutron dosimetry. The neutron dosimetry is a combination of a scintillating fiber stack, two image intensifier units.

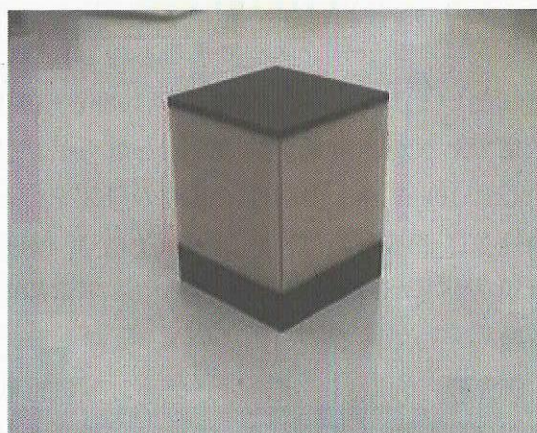


Fig.2 Photograph of the scintillating fiber stack.



## 2.3 試験方法

平成16年度は、これまでに試作、購入した主要部品を組み合わせでセンサーの基礎データを取得した。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、2個用いるべきところを、片方のイメージ・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、PMT (R329, Hamamatsu Photonics Co.) を用いた。本システムでこれまでに宇宙線、陽子、鉄イオン、炭素イオン等の飛跡データを取得した。

## 2.4 画像ひずみ

今回の開発したイメージインテンシファイヤは、CCD が小さかったことからファイバーテーパの比を大きくとっていること、更には CCD を 4 個使用したことにより大きな画像歪みが存在する。5mm 間隔の格子状に  $20\mu\text{m}\phi$  の穴の開いたマスクをイメージインテンシファイヤの前面に置いて、上から微弱な平行光をあてることにより穴の位置の画像を取得した。実際のマスクの穴の位置と得られた画像上での穴の位置から画面補正の関数を求め飛跡を補正している。

## 2.5 照射試験結果

取得した飛跡の 1 例を Fig. 3 及び Fig. 4 示す。Fig. 3 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 ( $0.25\text{mm}\times 0.25\text{mm}$ ) に相当し、ブラッグピークもはっきりと見ることができる。Fig. 4 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も取得できている。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量の分布を調べることで、エネルギー分解能を確認した。Fig. 5 に示すとおり鉄粒子のエネルギー分解能は、半値幅で 10%以下と「シンチレータ+イメージインテンシファイヤ+CCD」というシステム構成にしては非常に良いエネルギー分解能を得た。

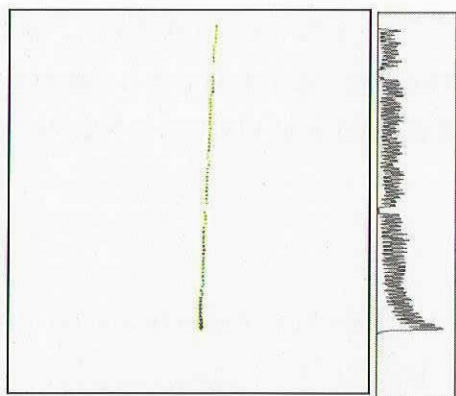


Fig.3 Image of Fe ion track with a clearly Bragg peak (right) and with corresponding 1D projection (left).

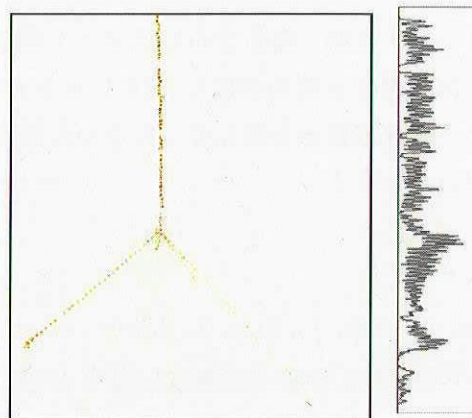


Fig.4 Image of C ion track with a \*\* (right) and with corresponding 1D projection (left).

また、粒子により LET が大きく異なり最適なイメージインテンシファイヤーのアノード電圧を決める必要があったので、アノード電圧と発光量の関係を調べた。Fig. 6 に示すとおり、アノード電圧と発光量の関係は、比例関係にあり発光量は、約 100V 上げるごとに 2 倍程度明るくなる。計測エネルギーのダイナミックレンジは、LET=発光量とした場合、計測範囲を相対論的速度領域にある電子・陽子の LET (0.2 keV/ $\mu$ m) から相対論的速度領域にある鉄粒子の LET (135 keV/ $\mu$ m) を想定しているの、鉄粒子/電子・陽子の比から 700 以上必要となる。このため、現在の 8 ビット ADC システムでは、目標とする計測範囲を達成できないと考えて、将来 16 ビット ADC システムに変更することも考えていた。

しかし、Fig. 6 を見ると鉄 500MeV/nuc の LET (1870 keV/ $\mu$ m) と陽子 135MeV の LET (5.97 keV/ $\mu$ m) の比が約 315 になることが予想され、現在のシステムでもアノード電圧を 1950~200V 程度にすることで目標とする計測範囲を実現できそうである。これは、LET が大きくなった際、損出エネルギーの全てが発光に寄与しないクエンチング（消光）現象によるものである。

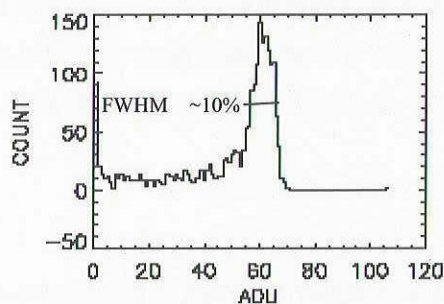


Fig.5 Distribution of the identical LET.

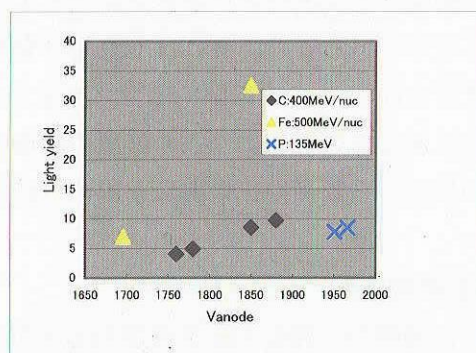


Fig.6 Relationship between light yield and anode voltage.

### 3. まとめ

宇宙線、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、エネルギー分解能も、半値幅で約 10% 以下と達成し、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アノード電圧および発光量から、LET を算出する式を求める。また、クエンチング現象を明らかにし、16 ビット ADC を用いた場合、LET がどこまで計測できるか検討する。

最後に、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