

# 宇宙船内における中性子線被ばく評価のための開発研究

放医研 中村尚司、保田浩志\*、高田真志、矢島千秋、本間壽廣、原子力機構 佐藤達彦

## Research and Development for Neutron Dosimetry in Spacecraft

*Takashi Nakamura, Hiroshi Yasuda\*, Masashi Takada, Kazuaki Yajima, Toshihiro Homma and Tatsuhiko Sato*

\*National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa Inage Chiba 263-8555  
E-Mail: h\_yasuda@nirs.go.jp

**Abstract:** Information on accurate spectrum and its spatial distribution of cosmic neutrons are important for radiological protection of spacecraft crew. However, measurement of high-energy neutrons is still difficult because detector signals from neutrons are mixed with those from other components such as protons and heavy ions. Therefore, we try to develop a new monitoring system that can simply measure energetic cosmic neutrons in addition to protons, heavy ions and photons/electrons. For testing the feasibility, experiments of cosmic radiation measurements were performed in a jet aircraft using the newly developed instruments. It was verified that cosmic neutron with the energy greater than 10MeV can be successfully detected separately from other components, though further study is necessary for determination of energy spectra of high-energy cosmic neutrons.

宇宙飛行士の放射線被ばく管理を適切に監視・低減するため中性子線量の正確な把握は重要であるが、宇宙船内での測定・検証は未だ困難な状況にある。そこで、当チームでは、（財）日本宇宙フォーラムの公募地上研究による支援を得て、高エネルギー域（>10MeV）の中性子を陽子等と弁別して検出し、エネルギースペクトルをオンサイトで精度よく評価するための測定装置を新たに開発、航空機を利用した実測でその弁別機能を検証した。

### 研究の背景と意義

宇宙飛行士が浴びる放射線には、銀河や太陽から飛来する荷電粒子（陽子及び重粒子）に加え、それらが船壁等と反応することにより発生した中性子等がある。このうち中性子の寄与は、被ばく管理の指標となる実効線量（がん及び遺伝的影響を意味する確率的影響の大きさを示す線量）の半分近くを占めると見積もられており、ISS 宇宙飛行士の放射線健康管理を適切に実施する上で、その精確な把握が重要であることは論を待たない。

しかしながら、過去行われた宇宙船内測定では荷電粒子が主な対象であり、線量評価の観点から中性子スペクトルを実施した例は 2001 年に宇宙開発事業団（当時）により実施されたボナーボール中性子検出器（BBND）による測定が唯一といってよい。宇宙飛行士の被ばくにおける中性子の寄与の大きさを考慮すれば、こうした現状は適切とはいえない。

中性子の線量を正確に知ることの重要性が認識されながら、未だ精密な検証が成されていない主因は、宇宙船内の限られた空間において高エネルギーの中性子を荷電粒子と弁別して測定することの技術的な困難さにある。この困難を克服するには、従前から地上で用いられてきたコンベンショナルな測定装置では不十分であり、新たなコンセプトと先端的な技術やノウハウを取り入れた、宇宙線専用の測定装置が必要である。

そこで、本研究では、BBND 等減速材式の検出器では測定困難な高エネルギー域（>10MeV）の中性子に焦点をあて、この領域のエネルギースペクトルを ISS 与圧部内にてオンサイトでモニタリングする装置の開発を進めてきた。オンサイトで利用できるという特長は、突発的な太陽粒子現象（SPE）の発生に伴い地上との電波通信に障害が出たような場合においても安定したデータ取得を可能とし、宇宙飛行士の被ばく管理に必要な情報の欠損を防ぐ上で大きな意義がある。

また、本装置が実用化すれば、ISS を実験室とした宇宙利用科学（生命科学、物質科学および基礎的科学）の基盤を成すインフラとしての大きな貢献も期待できる。

### 測定装置の概要

本研究で開発した測定装置は、大きく検出部と信号処理部に分けることができる。検出部では、モデル計算に依らず、得られる信号

を中性子とそれ以外の成分（荷電粒子、ガンマ線等）とに直接弁別して検出する。検出部は、信号減衰時間が短い液体シンチレータの周囲を減衰時間の長いプラスチックシンチレータが覆う構造をしており、装置を小型にする狙いから光電子増倍管は1つだけとしている（Fig.1）。

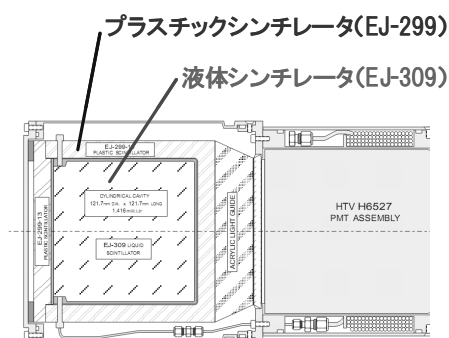


Fig.1 Cross sectional view of the newly developed phoswich-type neutron detector.

中性子と荷電粒子等との弁別は、検出部から得られる波形の違いを利用して行い、中性子がもたらす比較的短い減衰パターン（液体シンチレータからの信号）と陽子等がもたらす長い減衰パターン（2種類のシンチレータからの混在した信号）を選別して取得する。

検出部の応答特性は、放医研のサイクロトロンや重粒子線加速器（HIMAC）で得られる中性子線や陽子線ビームを用いた実験で調べ、期待したとおりの良好な発光特性や粒子弁別能を持つことを確認した（Fig.2）。

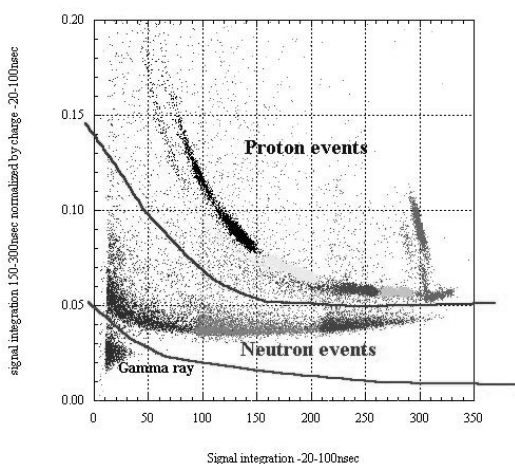


Fig.2 The particle discrimination property examined using 160 MeV proton beam at NIRS-HIMAC.

データ処理部には、上記検出部からのアナログ信号（0～5V）を高速で処理するための専用データロガー（以下「DL」という。）を新たに開発した。当該 DL は、入力信号波形を 500MHz（2ns 間隔）のサンプリングスピードで、12bit のデジタルデータに変換しつつ、USB2.0 インターフェースで外部機器へ送出する機能を持つ。トリガーレベル（データ取得を開始する DC 電圧の基準値）は、0～100mV の範囲を 256 段階でプログラマブル設定可能で、トリガー以前の 10 ポイント（-20～0nsec）とトリガー以降の 200 ポイント（0～400nsec）の合計 210 サンプリングデータを抽出する。また、トリガレベルを超えたイベント回数を記録する 32bit のイベントカウンタ（デッドタイム時の信号とりこぼし検証用、本体のモニタに表示される）と 1 秒間隔で経過時間を計測する 16bit タイムスタンプを備えている。外部へ送出するデータは、1 イベントあたり前述の 210 ポイントに対応する 420byte にイベントカウンタの下位 2byte とタイムスタンプの 2byte を付加した合計 424byte になる。

当該 DL は、トリガ検知からデータの抽出、外部への送出終了までを 1m 秒以内に完結し、1kcps 迄の計数率に対応できる性能を持つ。

その他、当該 DL には、宇宙船や航空機内での使用に耐えられるよう、電磁波対策の施されたケースを持ち、外部から電源供給がある環境において 10 時間以上の連続運転が可能であるといった特長がある。

さらに、PC 上でのデータ取得を効率よく行うためのプログラムを新規開発した。同プログラムは、検出部から DL を介して送られてきた信号波形のデジタルデータを記録するとともに、粒子ごとの信号を識別し、ユーザーからの求めに応じてアンフォールディング計算を行い、エネルギースペクトル及び線量のトレンドを自動的に算出、結果を PC 画面に二次元グラフで表示する機能を持つ。ソースコードの開発言語は Visual Studio 2005（主として Visual Basic）で、実際のデータ取得・解析作業では、実行ファイルを使用する。

当該プログラムの画面表示例として、東北大学ラジオアイソトープ・サイクロトロンセンターの準単色中性子ビーム（65MeV）を用いた実験で得られた結果を Fig.3 に示す。長寿命成分（縦軸）の少ない位置に中性子のプロットが現れることが確認された。

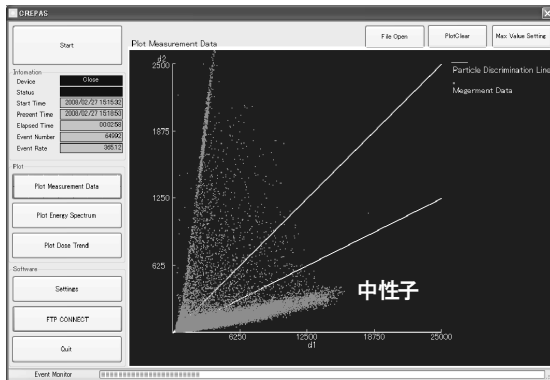


Fig.3 Two dimensional plots of signal integrals obtained for 65MeV neutron beam at CYRIC, Tohoku University.

### 航空機利用実験

本研究で開発した測定装置等の性能を確認するため、日本宇宙フォーラムならびにダイヤモンド・エア・サービス（DAS）社の協力を得て、同装置を航空機に搭載して巡航高度における宇宙線の測定を行った。実験にあたっては、本研究のターゲットであるフォスウィッチ型中性子測定装置に加えて、上空の宇宙線環境を検証することを狙いとして、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が開発したボナーボール中性子検出器（BBND）を含む、いくつかの機器（シンチレーション検出器、減速材付中性子検出器、電離箱式荷電粒子検出器、中性子レムカウンタ等）を同時に搭載した。

航空機には DAS 社が所有する小型ビジネスジェット機（MU-300）を利用、同社の在る県営名古屋空港から北側（日本海側）又は南側（太平洋側）の指定空域を飛行した。本研究で開発したフォスウィッチ型検出部を用いての実験は 4 回のフライトで行ったが、本報では、このうち 2007 年 10 月 24 日の南側空域飛行ならびに 2008 年 2 月 13 日の北側空域飛行の 2 回の実験について報告する。

1 回目（2007 年 10 月 24 日）のフライトでは、MU-300 に実験装置を搭載して 93 分間（9:43 離陸～11:16 着陸）の飛行を行い宇宙線の測定を実施した。空域内では約 50 分間 30,000ft (9.1km) の高さを巡航して頂き、北緯 34° で約 54 分間の測定ができた。

2 回目（2008 年 2 月 13 日）には同じ機材の

配置で 140 分間（11:18 離陸～13:38 着陸）の飛行を行い宇宙線の測定を実施した。空域内では 70 分間 36,000ft（GPS 高度では 35,000ft）の高さを巡航して頂き、北緯 39° で 47 分間の測定ができた。名古屋空港と空域（G）間は、往路・復路とも高度 28,500ft で飛行した。上記 2 回の実験における飛行航路を Fig.4 に示す。

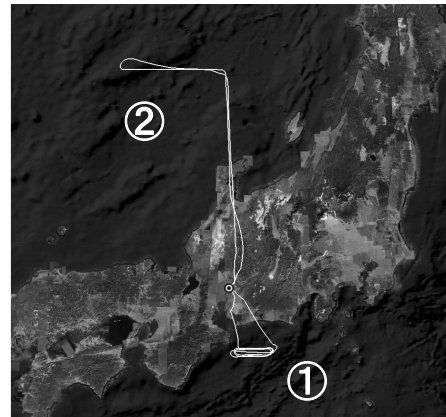


Fig.4 Two flight routes for cosmic radiation measurements.

本研究では、宇宙船内にも適用できる、高高度の宇宙線環境をより精緻に再現するモデル計算技法の開発に並行して取り組み、航空機利用実験の飛行高度・ルートにおける宇宙線中性子のエネルギースペクトル及び線量を短時間で計算できるコード（「PARMA」と命名）の検証も行った。開発にあたっては、日本原子力機構が中心となって開発・普及を図ってきた PHITS コードをベースとした。

PARMA コードで計算した指定空域内における中性子線量の推定値は、2007 年 10 月 24 日が  $0.75\mu\text{Sv h}^{-1}$ 、2008 年 2 月 13 日が  $1.33\mu\text{Sv h}^{-1}$  となった。これらの値は同時に搭載した拡張エネルギー型レムカウンタの実測値<sup>1)</sup>とよく一致し、当該測定器の応答特性（eV から GeV オーダに及ぶ  $H^*(10)$  近似応答）に照らして、モデル計算の正確さが検証されたといえる。

一方、市販のシンチレーション型中性子レムモニタでは、モデル計算値に比して相当大的な値（8 倍程度）が示された<sup>1)</sup>。当該モニタは地上の環境では問題なく使用されていることから、この過大評価は上空特有の宇宙線成分、すなわち陽子の寄与が大きいと考えられ、本研究で開発した粒子弁別機能を持った中性子測定装置の必要性を裏付ける結果となった。

2007年10月に本研究で開発した中性子測定装置で得られたデータをFig.5に示す。ただし、この時点ではオンサイトデータ解析プログラムが完成していなかったため、フライト終了後に別のデータ解析用プログラムを用いてデータ解析を行った。図から分かるように、バックグラウンドではほとんどの信号がミュオンであるが、上空では高エネルギーの陽子や中性子の寄与が現れることが分かる。ただし、ミュオンの強度も上昇し、そのためエネルギーの低い中性子との弁別が難しくなっている。ミュオンの寄与が小さいと推定される宇宙船内ではこの問題は回避できると考えられるが、遮蔽の厚い場所での使用も想定し、粒子弁別の方法について再考した。

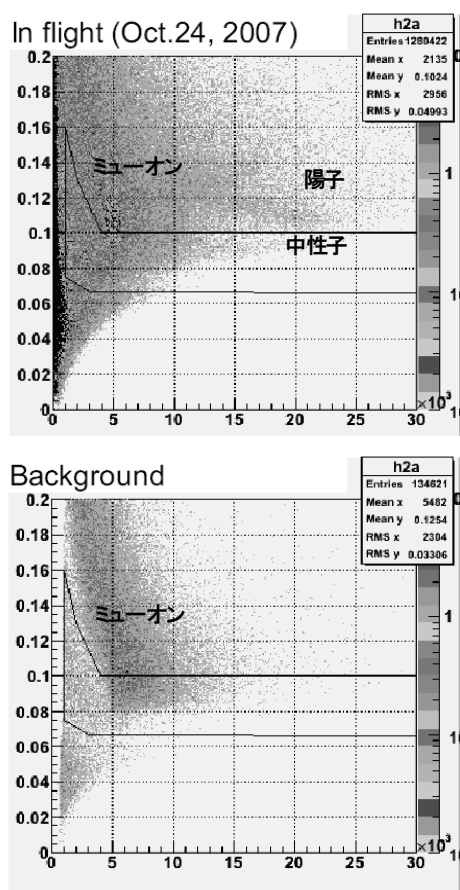


Fig.5 Plots of observed data obtained with the neutron detector in the flight on Oct.24, '08 (above) and on ground (below); X-axis shows integrated short-life signals and Y-axis shows long-life signal components.

2008年2月13日の実験で得られたデータについて、より厳密な方法で粒子弁別を行い、

国内数箇所の中性子照射施設で得られた応答データに基づくアンフォールディング計算を行って得られたエネルギースペクトルをFig.6に示す。比較のため、PARMAで計算したスペクトル及びBBNDで得られた15MeV以下のスペクトルも示す。開発した装置で導出されたエネルギースペクトルは、オーダーや定性的な形状は近いものの、モデル計算による予測と一致するとは言い難い。この差異の原因を明らかにするためには、100MeVを超える中性子に対する応答関数をより精緻に整える必要がある。

宇宙船での実用化にあたっては、システム全体の小型化・軽量化が最大の課題である。

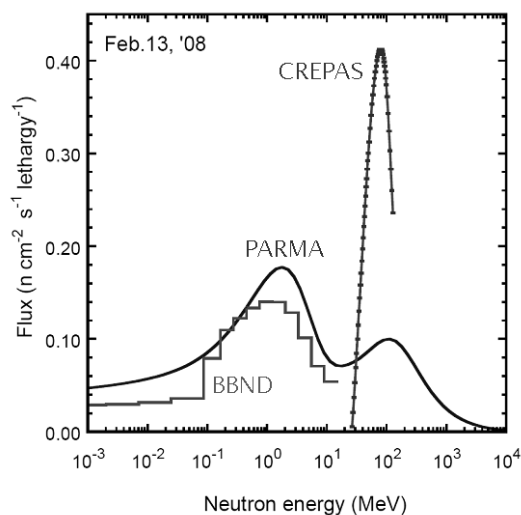


Fig.6 Neutron energy spectra obtained with CREPAS (above 25MeV) and BBND (below 15MeV) compared to model predictions for the flight at Feb.13, '08.

## 謝辞

本研究を懇切かつ根気強くご支援くださった藤島徹様はじめ日本宇宙フォーラムの関係各位に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。また、航空機利用実験を完璧にサポートしてくださったダイヤモンド・エア・サービス社の皆様に深く感謝します。

## 参考文献

- 1) Yasuda, H. et al. Responses of Selected Neutron Monitors to Cosmic Radiation at Aviation Altitude. *Health Phys.*, in press.