



## 宇宙船内における中性子被ばく線量評価に関する開発研究

放医研 保田浩志\*、高田真志、中村尚司、 JAEA 佐藤達彦

### Research and Development for Neutron Dosimetry in Spacecraft

*Hiroshi Yasuda\*, Masashi Takada, Takashi Nakamura and Tatsuhiko Sato*

\*National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa Inage Chiba 263-8555

E-Mail: h\_yasuda@nirs.go.jp

Abstract: It is important to know the accurate spectrum and its spatial distribution of cosmic neutrons for radiological protection of spacecraft crew. However, measurement of high-energy neutrons (>20MeV) is still difficult because detector signals from neutrons are mixed with those from other components such as protons and heavy ions. We thus try to develop a portable monitoring system that can simply measure energetic cosmic neutrons in addition to protons, heavy ions and photons/electrons. For testing the feasibility of our concept, experiments of cosmic radiation measurements were performed in a jet aircraft using several detectors. Measured doses are compared to model calculations. It was verified that cosmic neutrons can be distinguished with a Phoswich-type detector.

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、我々のチームでは、ISS において高エネルギー（～数百 MeV）の宇宙線中性子を荷電粒子等と弁別してオンサイトで測定することのできる、メンテナンスフリーで安全性にも優れた可搬型の ISS 用中性子測定装置の開発・実用化を目指している。以下、その概要と課題等について、2006 年 2 月に実施した航空機実験の結果を交えて紹介したい。

#### 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、その正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のはほとんどは荷電粒子を対象にしたものであり、線量評価の観点から中性子測定を実施した例は 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

言い難い。

中性子による被ばく線量を正確に知ることの重要性が認識されながら、未だその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等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・ノウハウを取り入れた、宇宙船専用の高エネルギー中性子測定装置が必要である。

こうした背景の下、本研究では、減速材式の検出器（BBND 等）では測定困難な高エネルギー領域 (>10MeV) の中性子に焦点をあて、この領域におけるエネルギースペクトルをオンサイトで精度よく実測できる装置を開発して ISS 与圧部内でのモニタリングに供することを目指している。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ことができる点で大きな意味がある。

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も大きく貢献できると期待される。

#### 測定装置の概要

本研究で開発を進めている測定装置は、大

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）とに直接弁別してリアルタイムに検出する。検出部の構成は、信号の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（どちらも国連発表の航空機搭載可能な物質であることを確認済み）が覆っている構造を持っており、測定器全体を小型化する狙いから光電子増倍管は1つだけとしている（Fig.1）。

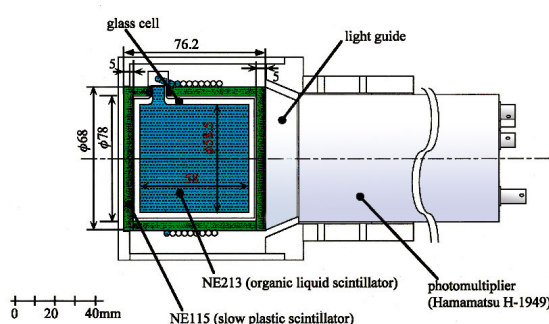


Fig.1 Structure of the phoswich-type neutron detector developed in NIRS.

中性子と荷電粒子等との弁別処理は、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）の波形データを選別して取得する。現在開発中のデータ処理部は、シンチレーション検出器から出力される最大 5V のランダムに検出される信号を、2nsec 間隔で、トリガー (-100mV) 時点より -20nsec から 400nsec の時間幅において取得し、最大 1000Hz のイベントの信号を 10 時間以上連続で自動的に PC へ USB 伝送→保存する性能を持つ。

事象別に取得したフルエンスのデータについて、予め求めておいた応答関数によりその波高分布をアンフォールディング（逆変換）して、中性子エネルギースペクトルを導出する。そのためのプログラムには、実績があり比較的容易に扱うことのできる FERDO-U コードを使用する予定である。当面このアンフォールディング計算は、市販のノート型 PC 上で行うこととするが、将来にはアンフォール

ディングのプログラムを組み入れた小型のデータ処理部を開発して、エネルギースペクトルの導出がオンサイトで迅速に行えるようにする計画である。

測定装置の有効性は、航空機を利用した高高度の宇宙線環境での実測により確認する。航空機高度の宇宙放射線は、高エネルギー陽子（1GeV 前後）と広いエネルギー範囲（熱中性子～GeV）の中性子が混在しており、線量レベルは一桁低いものの、線質は宇宙船内とよく似た放射線環境にある。以下、2006 年 2 月に実施した第 1 回目の航空機利用実験の結果概要について述べる。

### 航空機利用実験

航空機実験は 2 日間に計 2 回実施した。飛行航路は、県営名古屋空港を起点として、初日（2006 年 2 月 16 日）が日本海方面の北ルート、2 日目が太平洋方面の南ルートである。北ルートの飛行時間は 2.3 時間、南ルートは約 2.0 時間のフライトであった。航路は小型の航空機用 GPS を用いて測定・記録した。

航空機に搭載した装置群は、大きく 5 つのタイプの測定系で構成され、2 インチのフォスウィッチ型中性子検出器（Fig.1 参照）をはじめとして、CsI の固体シンチレーション検出器、電離箱測定器（応用技研 AE-233L）及び中性子レムカウンタ（富士電機システムズ NSN2 の改良版）等である。本研究で開発を目指す装置の原型となる。なお、固体シンチレータは今回の実験ではフォスウィッチ検出器の補完用として使用、電離箱測定器は電離成分の吸収線量を、中性子レムカウンタは 15MeV 以下の中性子の線量（1cm 周辺線量当量）を測るために選んだ。

中性子レムカウンタで得られた中性子線量率（～20 分間の平均）は、北ルートにおいて、高度 20,500ft で  $0.18 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、高度 28,000ft で  $0.35 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、南ルートでは、高度 20,500ft で  $0.17 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、高度 28,500ft で  $0.32 \mu\text{Sv h}^{-1}$  となった。電離箱で測定した電離成分の線量率（～20 分間の平均）は、北ルートにおいて、高度 20,500ft で  $0.34 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、高度 28,000ft で  $0.98 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、南ルートでは、高度 20,500ft で  $0.36 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、高度 28,500ft で  $0.83 \mu\text{Sv h}^{-1}$  であった。

電離箱の線量率データ（20 秒間隔で記録された指示値）には、ファクターで 2 を超える突発的な変動が観察されたが、これは機体の

振動が影響したものと考えられる。

中性子（レムカウンタの指示値）及び電離成分（電離箱の指示値）の線量は、高度の上昇により単調増加し、20,500ftから28,000ftに上がると、中性子成分はどちらのルートでも約2倍となった。電離成分については、北周りでは約3倍、南周りでは2倍強となり、緯度による違いが認められた。

中性子と電離成分の線量の比（レムカウンタの指示値／電離箱の指示値）は、高度20,500ftで50%前後、高度28,000～28,500ftで40%弱となった。モデル計算に基づけば中性子の線量は電離成分よりも相対的に高くなければならないが、このことは、航空機高度の宇宙線には中性子レムカウンタで実測できない高エネルギー（>15MeV）の中性子成分が相当の割合を占めていることを示唆している。実際、PHITSコードをベースとしたモデル計算によって予測した中性子エネルギー分布（Fig.2）から評価した実効線量値とレムカウンタで得られた値とを比較すると、測定値は予測値の60%程度となった。残りの40%が、本研究の測定装置開発におけるターゲットとなる中性子成分に相当する。

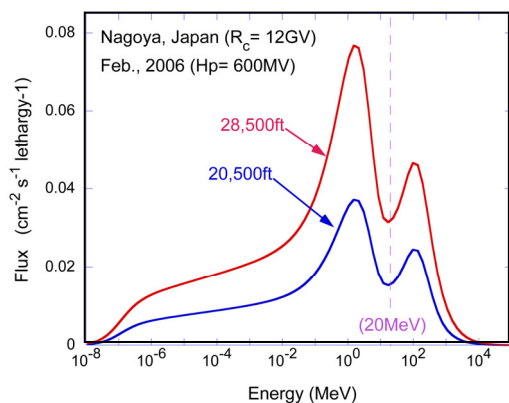


Fig.2 Predicted energy spectra of cosmic neutrons at Nagoya airport in February, 2006.

航空機内と地上においてフォスウィッチ型中性子検出器により取得された信号の二次元プロットを Fig. 3 に示す。図の横軸は各イベント（シンチレーション）の短寿命蛍光成分の積算量、縦軸は長寿命蛍光成分の短寿命成分に対する比である。地上のデータとの比較から、高高度では中性子や陽子の信号が明らかに増加することが確認され、本検出器が宇宙

線構成成分の弁別測定に有効であることが実証できた。しかしながら、今回のような短時間のフライトで比較的小型の検出器を用いた測定では、エネルギースペクトルの導出（アンフォールディング解析）に必要なイベント数を取得することができず、残念モデル計算との比較によって測定の精度を論じるまでには至らなかった。

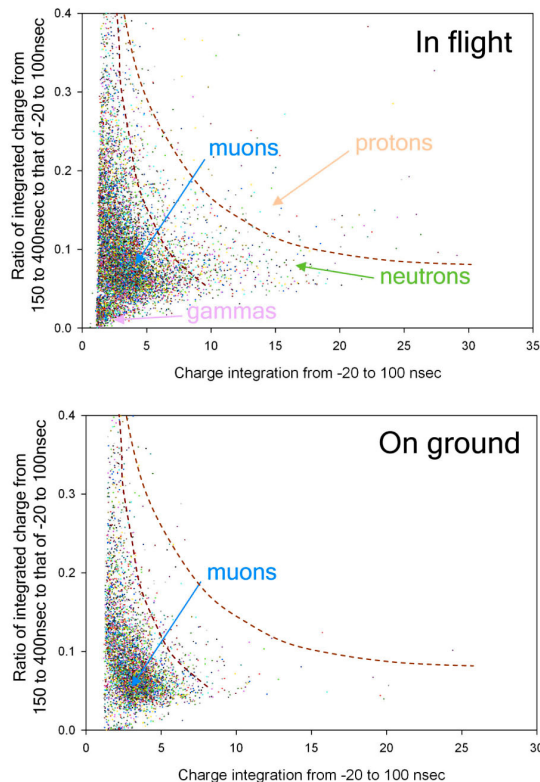


Fig.3 Plots of observed data obtained with the phoswich-type neutron detector in the jet flight (above) and on ground (below); X-axis values are integrated intensities of short-lifetime signals and Y-axis values are ratios of long-lifetime signal intensities to short-time ones.

### 今後の課題と対策

これからの課題として、まず、高速信号処理回路の開発がある。センサ部（複合シンチレータ）からの電氣的出力パルス信号のデジタル波形に基づき、中性子由来のデータと荷電粒子のデータとをリアルタイムで識別・処理して解析部（ノートコンピュータ）へ高速伝送するデータロガーを製作する。検出部か

ら出力される信号波形を弁別するために必要な時間分解能は、どの粒子についても nsec オーダと非常に短く、かつ波高の高さも大差はない。したがって、検出器から出力される信号を数 nsec という高速で処理し波形データを粒子識別できる分解能が必要となる。こうした高速の信号処理においてはノイズの存在が大きな問題であるが、ここでは最新の高速演算処理技術を活用した波形解析を行うことにより、その解決を図る。アナログ-デジタル変換やコンピュータ上の弁別アルゴリズム等を一貫してハードウェア処理する設計により、信号処理装置全体を高速化・コンパクト化することも検討していく。

高高度の宇宙線環境での検証については、前回の航空機利用実験での経験（得られた信号数が少なく中性子のエネルギースペクトルを導出するに至らなかったこと等）を踏まえ、次回（2007年2月に実施予定）の実験では、大型のシンチレーション検出部を用いるとともに、一定高度での飛行をできるだけ長い時間行って取得信号数の増加を図りたいと考えている。なお、前回使用した検出部（液体シンチレータ）は、化学毒性が強く ISS への搭載が困難とされるキシレンをベースとしている点が問題視されたため、これを別の安全な物質に置き代えることを検討している。

並行して、「出力」としての中性子由来のパルス信号から「入力」すなわち観測対象として中性子環境を求めるためのアンフォールディング（逆関数推定）の技法を決定し、これをコード化する。中性子のエネルギースペクトル推定では、以前からアンフォールディング技術が活用されてきたが、入力条件により解が振動して物理的に在り得ない解（例えば負のエネルギースペクトル）が得られること等があり、標準の技法とされるものがない。本研究では、我が国で比較的普及している FERDO-U コードをベースに、フォスウィッチ型検出器について宇宙線のエネルギースペクトルを迅速に導出するのに最適なアンフォールディング用コードを構築する。

そして、これらの要素技術を放医研で開発中の検出部と併せて測定装置全体を構成し、信号の識別から中性子線量（実効線量）の算出までの一連の演算処理をリアルタイムかつオンサイトで実行できるプロトタイプ製作に挑む。

## 謝辞

航空機利用実験はダイヤモンドエアサービス社の協力・指導の下で実施された。本研究は、(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。記して謝意を表します。