

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月19日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510062

研究課題名（和文） リアルタイム中性子線量計の高度化と飛行体搭乗員の放射線被ばく線量計測への応用

研究課題名（英文） Characterization of Real-Time Neutron Dosimeters and Application to Aircrew Dosimeters

研究代表者

高田 真志（Takada Masashi）

独立行政法人放射線医学総合研究所・緊急被ばく医療研究センター・主任研究員

研究者番号：50291109

研究成果の概要（和文）：

航空機内の中性子被ばく線量の過大評価は、宇宙陽子線検出以外に、高エネルギー中性子検出の可能性があることが分かった。中性子被ばく線量を正確に実測するために、個人線量計内のシリコン素子の中性子に対する応答特性を評価した。開発したエネルギー付与モデルを考慮することで、シミュレーションで評価した応答関数は、加速器を用いた単色中性子の実測と、良い一致を示した。これにより、中性子実測の過大評価を解明でき、正確な中性子計測につながる。

研究成果の概要（英文）：

Overestimation of neutron doses at aviation altitudes have been induced from direct detection of cosmic protons but we found this overestimation could be due to high-energy neutron detections. We conducted experiments and simulations of response functions of neutron dosimeters. The experiments and simulations were done using mono-energy neutron sources produced by the accelerators, and using the Monte Carlo code, respectively. In the simulation, we added new energy deposition model, considering the Funneling phenomena. From our results, we will measure accurate neutron doses.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,100,000 | 630,000   | 2,730,000 |
| 2010年度 | 1,100,000 | 330,000   | 1,430,000 |
| 2011年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、放射線・化学物質影響科学

キーワード：中性子、モンテカルロコード、シリコン半導体検出器、陽子、航空機、線量計

## 1. 研究開始当初の背景

航空機搭乗員の放射線被ばく線量は、年間数 mSv にもなる。搭乗員は放射線従事者登録されていないにもかかわらず、年間の被ばく線量は原子力発電所の作業員よりも高い値

であり、一般公衆の被ばく限度を超える。このため、飛行体搭乗員の放射線被ばく線量を正確に評価し、モニターすることは、搭乗員の健康管理上、重要である。欧州の EURADOS、日本などでは、搭乗員の年間被ばく線量の上

限を設けるガイドラインを作った。日本では5mSvを上限とした。これらのガイドラインでは、計算による被ばく線量の記録の必要性を推奨しているが、これを担保するための航空機での実測が重要である。現在、陽子などの荷電粒子の被ばく線量は、さまざまな測定器（シリコン半導体検出器、シンチレーター、TLDなど）で計測されているが、中性子、特に高速中性子以上の中性子に関しては、全く無いのが現状である。さらに、これらの放射線環境の中性子による被ばく線量は航空機内で約半分、宇宙飛行体内で10-50%を占めると言われている。

これまでの測定で、中性子リアルタイム個人線量計を用いた中性子被ばく線量実測は、10-20倍の過大評価をされるとされており、これは、中性子の検出原理が、中性子と線量計に使用されているラジエーターとの核反応により生成された2次荷電粒子を計測している。地上の原子力発電所、加速器施設周辺などの放射線環境は、中性子とガンマ線しか無いが、航空機高度では、中性子以外に高エネルギーの陽子線も存在し、この陽子線は、シリコン検出器で直接、検出され、擬似中性子として、大きな中性子線量を与えてしまうため、正確な中性子線量の測定がなされていない。

## 2. 研究の目的

本研究は、ガンマ線、中性子以外に、高エネルギー中性子線と陽子線が混在する放射線環境である航空機高度で、航空機搭乗員の放射線被ばくを正確に実測するために、中性子の過大評価の原因を明確にする。航空機高度での複雑な放射線環境中でも中性子を、正確に実測し、線量を導出できる中性子線量計を開発を目指す。

## 3. 研究の方法

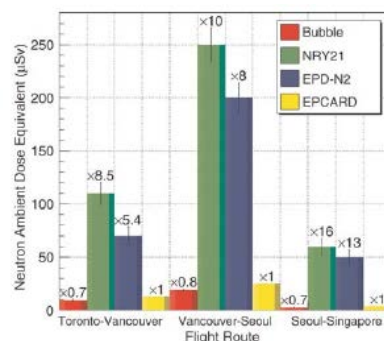
個人線量計を航空機に搭載し、宇宙線の実測を行い、これまでの計算結果との比較を行うことで、個人線量計で得られた実測値の妥当性と両者の結果の差異を検証する。さらに、実測から得られた結果を基にして、線量計の特性の改善を試みる。線量計の応答特性の精度を向上するために、シミュレーションによる評価、組み込むべき粒子線のエネルギー付与モデルの開発を行う。さらに、開発されたモデルを組み込んだシミュレーション結果を検証するために、産業技術総合研究所の加速器を利用した国家一次標準中性子ビームを用いた実測による評価も行う。両者から得られた結果から、さらなるモデルの改善を行う。

## 4. 研究成果

原子力施設で幅広く利用されているリア

ルタイム個人線量計（検出部がシリコン半導体）を、民間航空機に搭載し、地磁気緯度を幅広くカバーした実測を行った。宇宙線による放射線線量は、地磁気緯度、高度、太陽活動のパラメーターで評価できる。市販のガンマ線用の個人線量計で実測された線量は、非中性子による線量（ガンマ線、電子、陽子線、ミューオンなど）が、欧州で開発されたEPCARDコードを用いた評価と8%のばらつきで一致した。これにより、航空機内の非中性子成分の周辺実効線量当量は、市販のガンマ線用の個人線量計で十分な精度で実測できることが分かった。

同様のフライトで、中性子個人線量計を用いた実測を行い、計算コードとの比較を行った。得られた実測値は、計算コードよりも10倍近い、大きな値であった（下図参照）。この過大評価は、他のシリコン検出器をベースとした測定器でも同じ傾向であるが、バブル線量計は、計算コードと良い一致を示した。シリコン半導体検出器を用いた実測が、宇宙線を過大評価していることが実証された。しかし、実測値を検証した結果と、2次宇宙線を考慮したシミュレーションを用いた、検出線量率の評価から、本過大評価の原因は、高エネルギー陽子による検出のみでは説明できず、高エネルギー中性子に対する感度の過大評価もあることが示唆された。



高エネルギー陽子の検出を検証するために、従来の空乏層への陽子のエネルギー付与をシミュレーションした場合、線量計のしきい値の関係から、この過大評価は説明が出来なかった。しかし、我々は本課題を解明するために、線量計内で高エネルギー陽子によるFunneling現象が起こり、それによる感度の上昇を見出した。(M. Takada et al., IEEE Nucl. Sci. 56(1), 337-345 (2009)) このFunneling現象を考慮した新しい粒子線によるエネルギー付与モデルをシミュレーションコードに組み込むことで、実測値が計算評価を、20-30%の過大評価することが分かった。

しかし、このモデルを使用しても、陽子による過大評価は不十分であるため、中性子に対する応答特性を見直したが、数MeV以上の中性子に対する線量計の応答特性は、これま

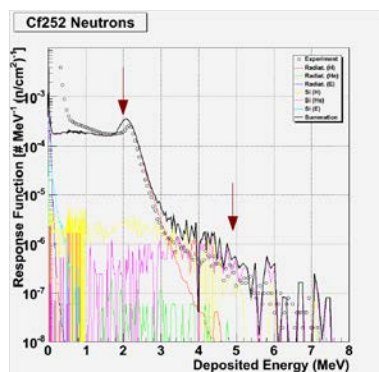
で十分な評価がなされていないため、シミュレーションと実測による評価を行った。

実測は、中性子照射フルエンスを高精度に評価されている産業技術総合研究所の国家1次標準場で DD 反応による中性子エネルギー5MeV と、DT 反応による 15 MeV と、Cf252 中性子線源で行った。入射角度依存性も評価した。エネルギー波高値は、アルファ線を用いた独立した手法で校正した。中性子個人線量計の特性評価と、シリコン素子中のエネルギー付与の評価に必要な素子については、富士電機株式会社の協力を得た。実測された波高分布は、2.2 MeV にピークを有し、入射角度の増大とともに広がっていく。

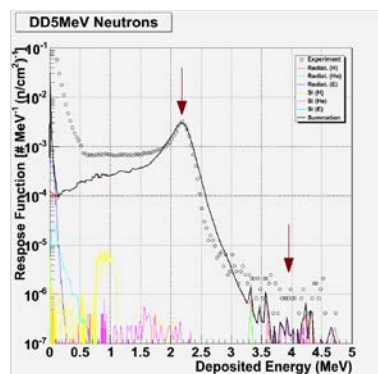
従来のモデルを用いたシミュレーションは、これまで作ることが出来なかったピーク (0.35 MeV) を導出できたが、実測値の 2.2 MeV のピークエネルギーには、まだ付与エネルギーが足りない状態であった。我々は、上記の Funneling 現象によるエネルギー付与量を拡張したモデルを組み込むことで、より実測値に近いピークを再現できるようになったが、まだ不十分であった。これまでの Funneling モデルは、数 10 MeV 荷電粒子のエネルギー付与によるものであり、これを全エネルギーに適用したが、これを数 MeV 領域かつ入射角度による依存性を、放医研のサイクロトロンにより加速されたビームを用いて、実験的に再評価した。これにより、数 MeV 領域のモデルが、数 10 MeV 領域のモデルと異なることを、新たに見出し、低いエネルギーの陽子に対するモデルを再作成した。このエネルギー領域の陽子は、高エネルギー陽子による形成される Funneling 領域を透過せずに、途中で止まってしまうことによる。

シミュレーションは、2段階に分けて実施された。中性子とラジエーター、シリコン素子中での反応挙動をシミュレーションし、シリコン素子への入射エネルギーを計算する部分と、シリコン素子中への入射エネルギーと陽子、アルファ粒子、電子による入射角度を考慮したエネルギー付与の波高分布を組み合わせて、実施した。

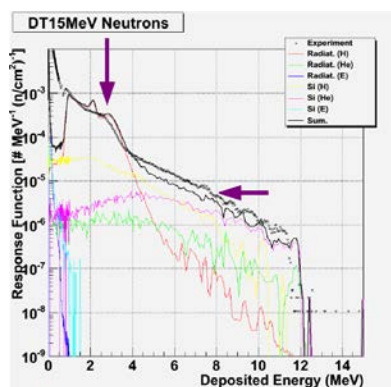
図(A)-(C)で、この改良を加えたモデルを用いてシミュレーションした応答関数(実線)と、実測した波高分布(白丸)を比較した。図-(A)が中性子線源 Cf252、-(B)が単色中性子源 DD 5 MeV、-(C)が単色中性子源 DT 15 MeV によるものである。図中には、中性子によりラジエーター、シリコン中で生成された陽子などの2次粒子によるエネルギー付与分布も示されている。



(A) 応答関数 中性子線源 Cf252



(B) 応答関数 単色中性子源 5 MeV



(C) 応答関数 単色中性子源 15 MeV

従来のモデルでは、図中の矢印で示した、これまで再現出来なかったピークと高エネルギー成分を十分に再現できている。絶対量もシミュレーションと実測値は良い一致をしている。ピークは、中性子と線量計素子に利用されているポリエチレンラジエーター中の水素との弾性散乱により生じた陽子によるエネルギー付与、高エネルギー成分は、中性子と素子中のシリコンとの反応により生成された陽子、アルファ粒子によるエネルギー付与である。中性子エネルギーが 15 MeV になると、シリコンとの中性子反応断面積が大きくなるために、その割合は大きくなる。低い波高エネルギーで実測値が、シミュレ

ションよりも大きいのは、ターゲットから発生するガンマ線、散乱中性子による寄与だと考えられる。

本実験による検証から、我々のモデルにより中性子応答特性を十分に再現できることが分かり、航空機中での中性子過大評価が、中性子線量計による原因の解明につながる。今後、高エネルギー領域にモデルを拡張し、過大評価の原因を追究し、航空機搭乗員のより正確な線量評価が可能な線量計の開発につながる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① M. Takada, T. Nunomiya, T. Ishikura, T. Nakamura, B. J. Lewis, L. G. I. Bennett, I. L. Getley, B. H. Bennett, “Measuring Cosmic-Ray Exposure in Aircraft Using Real-Time Personal Dosimeters”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 49 (2), 169-176 (2012)

[学会発表] (計3件)

① 高田真志、鎌田 創、布宮智也、安部 繁、石倉 剛、中村尚司、松本哲郎、増田明彦、原野英樹、「高速中性子センサーの応答特性の評価 (実測とシミュレーション)」、日本原子力学会「2011年秋の大会」、北九州国際会議場、2011年9月

② M. Takada, S. Kamada, T. Nunomiya, S. Abe, T. Ishikura, T. Matumoto, A. Masuda, H. Harano, T. Nakamura, “Neutron Response Functions of Silicon-based Real-time Personal Neutron Dosimeter: Experiments and Simulations”, the Sixth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-6), Langkawi, Malaysia, July, 2011

③ 高田真志、鎌田 創、布宮智也、安部 繁、石倉 剛、中村尚司、松本哲郎、増田明彦、原野英樹、「中性子検出器シリコン素子の高速中性子に対する実測とシミュレーションによる応答関数の評価」、日本原子力学会「2011年春の大会」、福井大学、2011年3月

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高田 真志 (Takada Masashi)

独立行政法人放射線医学総合研究所・緊急被ばく医療研究センター・主任研究員  
研究者番号：50291109

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

鎌田 創 (Kamada So)

独立行政法人放射線医学総合研究所・緊急被ばく医療研究センター・博士研究員  
研究者番号：30581649