

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（B）
 研究期間： 2009 ～ 2011
 課題番号： 21310042
 研究課題名（和文） グローバルな枠組みによる低エネルギー陽子線を用いた宇宙放射線線量計の研究
 研究課題名（英文） Research for space radiation dosimeters using low energy proton beams in a global framework
 研究代表者
 内堀 幸夫（UCHIHORI YUKIO）
 独立行政法人放射線医学総合研究所・研究基盤センター・課長
 研究者番号： 50342879

研究成果の概要（和文）：各国宇宙機関が使用している宇宙放射線評価用ルミネッセンス線量計を一同に集め、サイクロトロン加速器による陽子線を広く一様なビームに調整して、同じ条件で照射した。その後、各国研究者によって解析された結果を比較検討し、その特性を評価し、線量計の基礎的な理解を進め、評価結果の信頼度を高めることで、宇宙飛行士の長期滞在における線量管理に資する。

研究成果の概要（英文）：Luminescence dosimeters which have been used by space agencies and universities in the world were gathered and irradiated by wide, uniform and low energy proton beams from the cyclotron accelerators with same conditions. After experiments, these dosimeters were analyzed by the international collaborators and these analysis results were compared each other. Then, these characteristics were investigated and understood, so that their reliability has been higher and it is important for dosimetry for astronauts and cosmonauts who will stay long periods.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：放射線、X線、粒子線、ISS、線量測定、宇宙放射線、比較

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙放射線環境は、重粒子、陽子、中性子、 γ 線などが広いエネルギー範囲で存在する地上には存在しない放射線場である。このような環境に滞在する宇宙飛行士は地上よりも100倍以上の線量を被ばくしており、各国宇宙機関では重要な課題として被ばく管理が運用されている。しかしながら、そこで利用されている放射線線量計は、元来 γ 線を

対象に開発されたものであり、重粒子や陽子線など様々な放射線が存在する宇宙放射線環境に十分に対応できておらず、線量評価値に食い違いが生じていた。

(2) NASA、JAXA、ロシア生物医学問題研究所（IBMP）を始め世界各国の宇宙機関が集まる国際会議“国際宇宙ステーションにおける放射線モニタリングのためのワークショップ

(WRMISS)”において、この食い違いを理解し、信頼性の高い線量評価を行うため、地上の加速器施設を利用した、相互比較校正実験の実施必要性が勧告された。それに従い、我々は、当研究所の重粒子線加速器 HIMAC を使用して、同じ条件で各国の宇宙放射線線量計に様々な重粒子線ビームを照射し、それぞれの応答を比較してきた。(ICCHIBAN プロジェクトと称する。) これらの実験は、国外の加速器も利用して、6 年間にわたり 11 回行われ、NASA、JAXA、IBMP を含む 13 ヶ国 21 機関が参加した国際的な研究である。得られた結果の一部は、すでにまとめられているが、実験とともに線量計の理解が進み、現在では主要な受動型（電源を使わない積分型の検出器）線量計間のその食い違いは 10%以下になった。

(3) その後、ロシア IBMP の協力により、ICCHIBAN の枠組みで宇宙環境においても同様な国際比較実験が 2004 年から実施された。すなわち、国際宇宙ステーション・ロシアサービスモジュールにおいて、2 回の実験が行われ、10 カ国 12 機関の線量計が約 3 と 6 ヶ月、宇宙環境で曝露された。これらの宇宙実験の結果からは、依然、線量計間に 25%以上の食い違いがあることがわかった。

(4) この結果を受けて国際会議 WRMISS における議論・検討の結果、高い LET（線エネルギー付与）を持つ重イオンに対する固体飛跡検出器の線量評価方法の見直し、および、低い LET を持つ陽子等に対するルミネセンス線量計の応答の詳細な検討の必要性が勧告された。前者のために、既存の条件を使って HIMAC 重イオンビームによる校正実験が再度行われ、解析方法の確認等の作業が進んでいる。しかし、後者の陽子線による校正実験が必要であった。

2. 研究の目的

(1) このため、放医研のサイクロトロンから様々なエネルギーの陽子線あるいは軽粒子を供給し、それぞれのエネルギーに対して散乱体およびワブラー電磁石のパラメータを調整しビームを拡げて、均一な照射場を準備する。さらに、信頼性の高い線量評価を行う。

(2) これらの広く均一なビームを利用し、各種ルミネセンス線量計に同一の条件で照射し、その応答を比較検討し総合的に線量計を理解して、各国線量計の食い違いを縮小し、信頼性を高めることを目指すことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 放射線医学総合研究所のサイクロトロン

加速器から、30 から 80MeV の陽子線ビームあるいは He 原子核のビーム、すなわち LET=0.95~2.81keV/μm のビームについて、新たに広く平坦な照射野を構築した。照射野の確認のために、マルチチャンネルのシンチレーション検出器や、マルチピクセルの電離箱を新規に製作し利用した。(図 1)

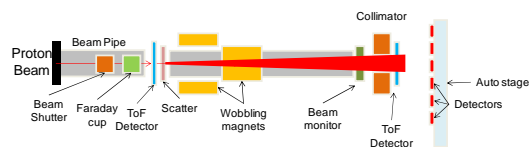


図 1 ビームラインに導入された散乱体、ワブラー電磁石、大型の電離箱、ToF 検出器、自動ステージなど。

さらにネットワークを通してコントロールできる自動ステージを導入し、また、既定の線量値に到達するとビームシャッターが閉まるように、オンラインの電離箱、カウンター等の制御系等を準備するなど、線量計等への照射が容易になるように、照射場の構築を進めた。これにより、本提案とは異なるが、他の物理実験、生物実験が容易に実施できるようになった。

(2) その後、各国宇宙機関・大学等からルミネセンス線量計等の各種線量計を用意してもらい、国際宅配便もしくは自ら持参して当研究所に集めた。これらの線量計を当研究所で準備した黒色のポリカーボネートを削りだして作製したホルダーに注意深く詰め、同様な照射条件になるように準備した。(図 2) いくつかのルミネセンス線量計は可視光に感度があるために、光が漏れないようホルダーを作製した。また、ホルダーに光に感度がある線量計を詰める際には暗室で作業を行った。



図 2 様々な計上をしたルミネセンス線量計を黒色ポリカーボネートのホルダーに詰めた。異なるグループの別の線量計と同じホルダーになることもあった。

これらの線量計ホルダーに対して、線量を変化させて照射する Linearity 実験、エネルギー吸収体を入れて 2 次粒子の影響見る実験、また、実験者に線量を示さない Blind 実験などを実施した。

前述のように、実験の際には、特に若手の研

研究者を中心に各国の研究者も照射実験に参加し、ビーム照射実験やあるいは線量計の校正についての教育に貢献できた。(図3)

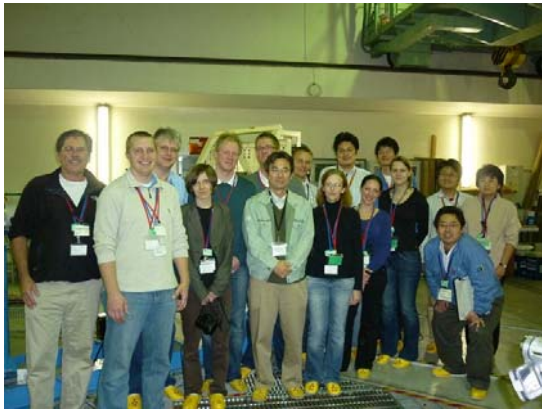


図3 当研究所のサイクロトロン照射コースに集まった、各国研究者。米国、ロシア、ドイツ、オーストリア、日本 JAXA 等の研究者が参加した。

(3) 照射実験後、速やかに各線量計はホルダーから取り出され、各研究機関に返還された。各研究機関では、それぞれの方法により解析を実施、結果をレポートにまとめて提出を受けた。

これらの結果は、ワーキンググループによりまとめられ、議論の上、国際ワークショップ WRMISS において報告され、当該分野の専門家によりさらに検討された。

4. 研究成果

(1) 放射線医学総合研究所のサイクロトロン施設の C-8 照射コースに、30、40、70 及び 80MeV の陽子線ビーム、および、100MeV の He 原子核のビームについて、散乱体の厚さおよびワブラー電磁石の強度を調整することにより、広く平坦なビーム照射屋を構築することができた。この時、約 70mm 直径の領域で ±5%以内の平坦度を実現した。(図4) 結果として、LET=0.86, 0.95, 1.5, 1.9, 8.6 keV/μm の領域の照射が可能になった。

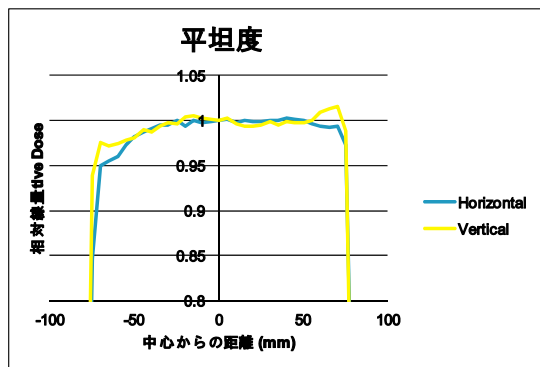


図4 計測された平坦度

さらに、国立がんセンター東病院において、235MeV (LET=0.4 keV/μm) の陽子線ビームの照射も行った。

照射の際に、位置による線量の違いも見積り、各国研究者に情報を提供し、正確な比較が可能になるようにした。(図5)

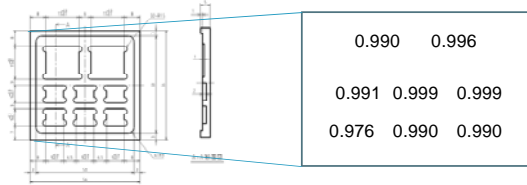


図5 ホルダーの中での線量計の照射線量の違いを見積り、実験参加者に提供した。

(2) これらのビームを使用し、照射実験を繰り返し、各国研究者よりその解析結果を得た。Linearity 実験においては、各国のいずれのルミネッセンス線量計についても、1mGy から 100mGy まで線形性が保たれていることがわかった。(図6)

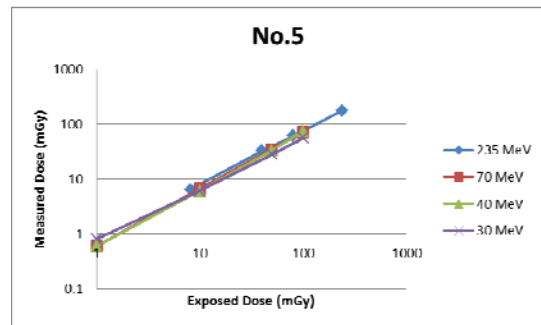


図6 Linearity 実験においては、線形性が確保されていることがわかった。

一方、各国研究機関の線量評価結果を単純に比較したところ、必ずしも照射された線量を正確に反映していない場合があった。(図7、8)

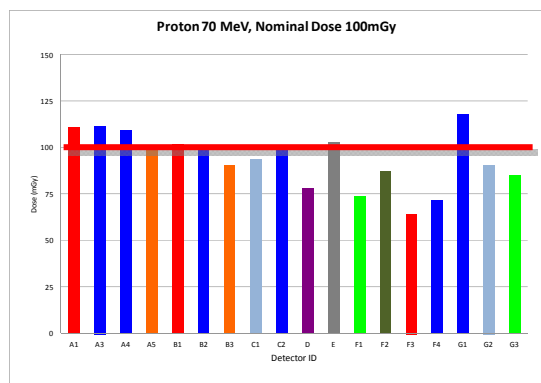


図7 各国線量計の比較。赤の直線が照射線量。70MeV 陽子ビームの場合。

しかしながら、対象を中性子とするような線量計を除く、主要な線量計については±10%程度に収まることがわかった。また、各国の線量計は種類によって、その線量評価値が分類されることがわかってきている。

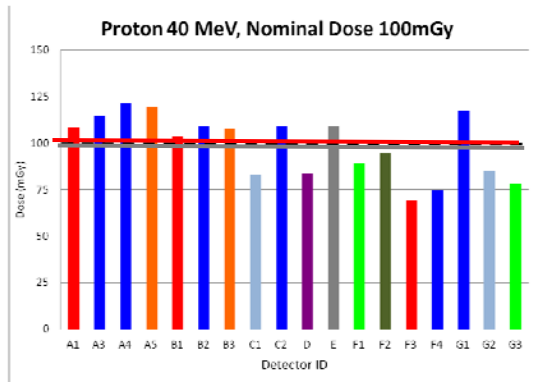


図8 各国線量計の比較。赤の直線が照射線量。40MeV陽子ビームの場合。

また、LETが変わるとその応答が変化することが明らかになっており、今後その観点から解析を進め、論文化する予定である。

平成23年度前半は、福島原発事故のため、研究代表者らは、被ばく医療支援・放射線管理・線量測定等の業務におわれ、必ずしも十分な時間を割くことができず、例えば宇宙放射線線量評価に関するガイドラインの作成等の課題に遅れが生じているが、近い将来に実現させたいと考えている。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計6件)

① Y.Uchihori, Radiation Protection for Fukushima Nuclear Power Plant and Heavy Ion Beam Utilization in HIMAC, JSPS-IVA Vast Sweden Joint Colloquium, 2011年10月14日, Gutenberg, Sweden (招待講演)

② H. Kitamura, Y. Uchihori et al., Preliminary Results of 2nd and 3rd Proton ICCHIBAN Experiments, 16th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, 2011年9月6日, Prague, Czech Rep.

③ Y. Uchihori, H. Kitamura et al., The

preliminary results of the Proton-ICCHIBAN-2 experiments for luminescence detectors, 15th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Frascati, Italy

④ Y. Uchihori et al., Preparation and Current situation of proton-icchiban-2 experiment, 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010年7月23日, Bremen, Germany

⑤ Y. Uchihori et al., Preparation of Proton Irradiation System for Intercomparison Experiments of Luminescence Detectors (Proton-ICCHIBAN-2), 14th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, 2009年9月10日, Dublin, Ireland

⑥ Y. Uchihori et al., Intercomparison Project of Space Radiation Detectors: ICCHIBAN, 5th International Workshop of Space Radiation Research, 2009年7月9日, Cologne, Germany

[その他]

ホームページ等

<http://www.nirs.go.jp/ENG/rd/lban/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内堀 幸夫 (UCHIHORI YUKIO)

放射線医学総合研究所・研究基盤センター・課長

研究者番号：50342879

(2) 研究分担者

北村 尚 (KITAMURA HISASHI)

放射線医学総合研究所・研究基盤センター・技術員

研究者番号：90443069

安田 仲宏 (YASUDA NAKAHIRO)

放射線医学総合研究所・基盤技術センター・主任研究員

研究者番号：30392244

(H21→H22年度：研究分担者、H23年度：研究協力者)

小平 聡 (KODAIRA SATOSHI)

放射線医学総合研究所・基盤技術センター・博士研究員

研究者番号：00434324

(H21年度：研究分担者、H22→H23年度：

研究協力者)

(3)連携研究者

俵 裕子 (TAWARA HIROKO)

高エネルギー加速器研究機構・放射線科学
センター・准教授

研究者番号：30188453

永松 愛子 (NAGAMATSU AIKO)

宇宙航空研究開発機構・宇宙環境利用セン
ター・主任開発員

研究者番号：00421868