

令和 5 年 4 月 28 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19850

研究課題名（和文）深宇宙への持続的な有人活動に資するその場個人被ばく線量計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of in-situ space radiation dosimetry for sustainable manned activity in deep space

研究代表者

小平 聡（Kodaira, Satoshi）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学研究所 計測・線量評価部・グループリーダー

研究者番号：00434324

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙における有人活動の場は、現在の地球近傍の国際宇宙ステーション（ISS）から月へと展開しつつあり、解決すべき技術課題の一つであるその場個人被ばく線量評価技術のフェジビリティスタディを行った。銀活性リン酸塩ガラス線量計チップを用いて、宇宙放射線を模擬した加速器ビームを用いた照射試験と線量評価プロトコルの作成、ならびに、ガラス線量計の読み出し光学系の検討と読み出し用リーダーの設計を行った。本研究が提案するその場個人被ばく線量計測方式が実用化されれば、現在抱えている技術的課題を解決し、深宇宙への持続的な有人活動に向けた大きな転換をもたらすと期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際宇宙ステーション（ISS）における個人被ばく線量計測法は1995年に提案されて以降、安定的な運用により着実に線量評価が実施されており、今や世界的に標準化されたと言って良い。しかしながら、深宇宙進出の皮切りとして、月版ISSである月軌道プラットフォームゲートウェイの建設計画が着々と進行しているにもかかわらず、月有人進出に必要な個人被ばく線量計測に関する議論は進んでいないのが現状である。本研究が提案するその場個人被ばく線量計測法は、深宇宙への持続的な有人活動や進出に資するものであるとともに、次世代の個人被ばく線量計測の世界標準になるものと考えている。

研究成果の概要（英文）：Deep space exploration will cause some differences in exposure duration and in dose contribution of heavy ions compared to the current Low-Earth-Orbit activity. We should understand the exposure risk due to space radiation and need it countermeasures by measuring exposure dose in deep space. In this study, we have developed a compact in-situ personal dosimetry system with Ag⁺-activated phosphate glass dosimeter chips. Heavy ion beam tests, a dose assessment protocol setting and a new dose measurement device design have been completed. Our proposed system will support a sustainable human activity in deep space.

研究分野：放射線計測学

キーワード：深宇宙探査 個人被ばく線量計 宇宙放射線

1. 研究開始当初の背景

宇宙における有人活動の場は、現在の地球近傍の国際宇宙ステーション (ISS) から月へと展開しつつある。2018年に国際宇宙探査協働グループ (ISECG) は、月を足がかりとした火星への有人進出を目指すロードマップを示している。月面探査については、2020年10月にアルテミス計画の国際合意がなされたところである。深宇宙有人探査が国際的に本格化している状況において、我が国でも月面での持続的な有人活動のための解決すべき技術項目が示されており (2019年8月文科省宇宙開発利用部会)、その一つが放射線環境対策である。

地球近傍から遠く離れた深宇宙は、地球磁場による宇宙放射線の遮へい効果が期待できない。このため線量寄与の大きい重粒子成分を含む宇宙放射線が直接降り注ぐ放射線環境であり、月面では年間420 mSv程度の被ばく線量になると試算されている。これは地球上の年間被ばく線量 (約2.1m Sv 日本平均) の200倍以上に相当する。過酷な放射線環境において解決すべき課題は2つあり、一つは遮へいによる被ばく線量の低減、もう一つは被ばく線量のその場計測、である。1つ目の遮へいについては、既に技術検討を進めており、長期間航行する宇宙機には複合材料を活用した遮へい材を有力候補としているほか、月面に存在する縦孔地形を利用することで月表面の10%まで被ばく線量を低減できることを明らかにしている。本研究では、検討課題の内、2つ目の「その場個人被ばく線量評価技術」の実現に挑戦する。

2. 研究の目的

深宇宙で正しく被ばく線量を評価するためには、入射粒子の線エネルギー付与 (LET) を正確に、その場で計測することが求められる。深宇宙探査では地球上に線量計を容易に回収できないため、現場で線量評価する必要がある。現在のISSでの線量計測・評価の運用には、個人被ばく線量計測技術として、CR-39固体飛跡検出器とルミネッセンス線量計 (TLD や OSLD) を組み合わせた受動型線量計が用いられているが、化学処理を要する工程があるため地球上に回収する必要があるほか、長期間にわたる曝露条件では累積線量が過大になり解析が困難になるため、深宇宙探査には対応できない。そこで、従来の受動型線量計に置き換わる新たな線量計測技術として、重粒子線を蛍光トラックとして観測し、入射粒子一発一発のLETを識別できる銀活性リン酸塩ガラス (以降、ガラス線量計) を用いたその場個人被ばく線量評価技術の確立を目指している。この技術は、計測に関わる全ての工程が光学系のみで閉じるため、従来法のような化学処理の工程が不要になり、単一の小型チップ素子で個人被ばく線量計測がその場で可能になる。また、放射線情報を消去する光学ブリーチング処理により再利用が可能になる。本研究では、ガラス線量計チップへの宇宙放射線を模擬した加速器ビームを用いた照射試験と線量評価プロトコルの作成、ならびに、ガラス線量計の読み出し光学系の検討と読み出し用リーダーの設計を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 線量評価の方法検討

従来の宇宙用の受動型線量計は、ルミネッセンス線量計を用いて低LET粒子由来の蛍光総量を蛍光読み取り装置で測定し、またCR-39固体飛跡検出器を用いて高LET粒子のトラックを光学顕微鏡で測定し、それらのデータを組み合わせて高い信頼性を実現している。本研究では、従来方式を踏襲しながらも、新規技術として、同一のガラス線量計チップ内から低LET粒子由来の蛍光総量 (RPL) を、高LET粒子の蛍光トラック (FT) を読み出して組み合わせることを検討している。重粒子線がん治療装置 HIMAC (重イオン加速器) を用いて、宇宙放射線を模擬した重イオン (鉄、シリコン、ネオン、炭素) を照射し LET 分布の測定を行い、測定レンジについてCR-39と比較した。また、実際の運用を考慮した線量評価プロトコルを作成した。

(2) 読み出し用リーダーの設計

ガラス線量計チップの読み取り装置は、レーザー励起蛍光検出系 (RPL モード) と 蛍光顕微鏡系 (FT モード) の2種類の光学系から構成される概念設計を元に、各要素技術の検証と読み取り用リーダーの詳細設計を行った。光学系と の要素技術について、光学素子 (光電子増倍管やイメージング素子) や光学フィルタ、励起光源等の要素パーツを一部借用しつつ、デモ測定機を構築して検証を行った。

4. 研究成果

(1) 線量評価の方法検討

さまざまな重イオンが混在する宇宙放射線を模擬したビーム照射によってガラス線量計チップに生成したFTの強度信号分布から水中LET値を換算し、図1のようなLET分布を得た。このLET分布を積分することによって吸収線量を評価することができる。ガラス線量計チップの水中LET検出下限値は約5 keV/μmであり、従前のCR-39の測定下限である10 keV/μm以上を満足するため、高LET粒子のLETスペクトル測定レンジとして十分である。

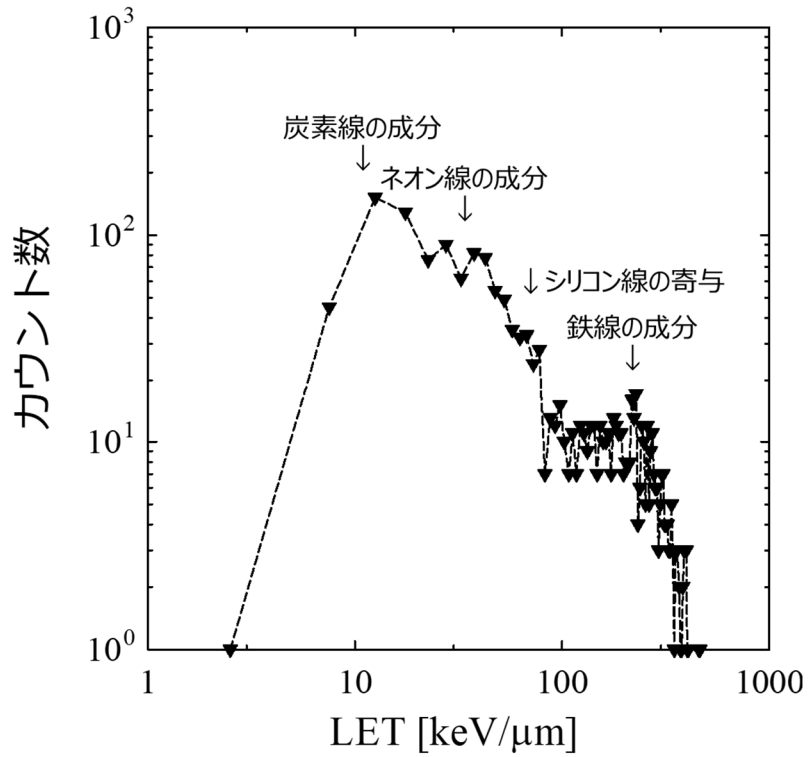


図 1. 宇宙放射線の主要な高 LET 粒子を模擬したビーム照射による LET 分布の測定結果.

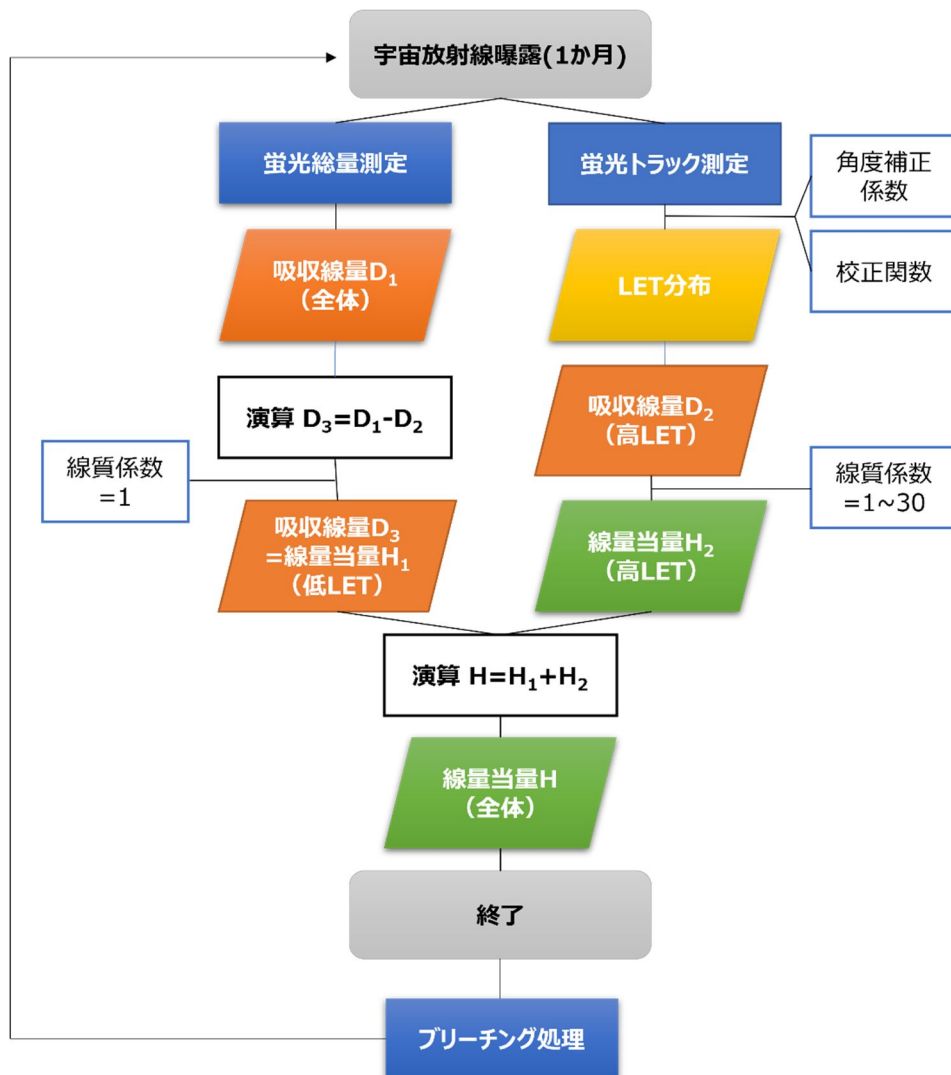


図 2. 線量評価のプロトコール.

線量評価方式として図 2 のようなプロトコルを策定した。ガラス線量計を宇宙放射線に曝露した後、読み出し用リーダーで RPL と FT の測定を行う。以下の式に示すように、RPL 総量から吸収線量 D_1 と $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 以上の高 LET 粒子の LET 分布から吸収線量 D_2 を求め、RPL 信号の応答係数を D_2 に換算した高 LET 側の線量寄与を D_1 から差し引いたものに (D_3)、 D_2 を足し合わせることによって、全 LET 範囲での吸収線量 D を評価する。更に、LET 分布の情報から ICRP-60 の線質係数 ($10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 以上の高 LET 粒子に対して変化) を換算し、高 LET 粒子の線量当量 H_2 を評価する。 $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 以下の低 LET 粒子の線質係数は 1 であるので、 $D_3=H_1$ となり、全 LET 範囲での線量当量 H は H_1+H_2 となる。線量評価後のガラス線量計チップは、紫外励起光源で光学ブリーチング処理することによって、放射線情報を消去して、再利用する。

$$\begin{aligned} D &= D_{\leq 10 \text{ keV}/\mu\text{m}} + D_{> 10 \text{ keV}/\mu\text{m}} \\ &= (D_1 - \kappa D_2) + D_2 \\ &= D_3 + D_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= H_{\leq 10 \text{ keV}/\mu\text{m}} + H_{> 10 \text{ keV}/\mu\text{m}} \\ &= D_3 + \int Q(L) \cdot D_2(L) dL \\ &= H_1 + H_2 \end{aligned}$$

(2) 読み出し用リーダーの設計

ガラス線量計チップの読み出し用のレーザー光学系と蛍光顕微鏡系の組み合わせ方式の概念 (図 3) を元に、 375 nm 半導体レーザー光源とバンドパスフィルターを経て光電子増倍管により RPL を読み出す光学系と、紫外 LED 光源からの励起光を $\times 40$ 対物レンズ (N.A.0.95) とダイクロイックミラーを介して FT の蛍光画像を CCD あるいは CMOS イメージングセンサから読み出す顕微鏡系の詳細設計を行った。それぞれの要素技術の評価については、デモ機をそれぞれ構築して、重イオン照射したガラス線量計チップからの RPL ならびに FT を検出可能であることを確認した。詳細設計では、装置内は遮光される仕様とし、ガラス線量計の FT 読み出しにおいて統計精度を 3% 程度になるよう測定範囲を拡張するため、一軸駆動機構を組み入れた。図 4 のように、機械・電源系の配線構造を考慮し、装置の堅牢性と安全性の観点から設計した。設計上の装置サイズは $470 \times 570 \times 640 \text{ mm}^3$ である。

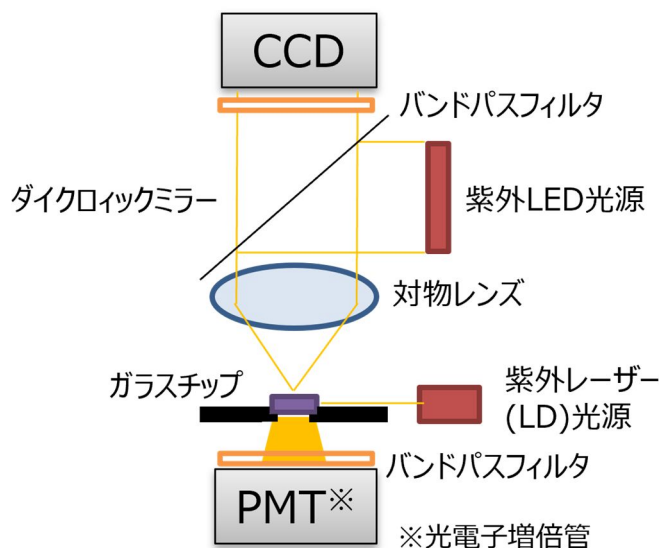


図 3. 読み出し用リーダーの概念図.

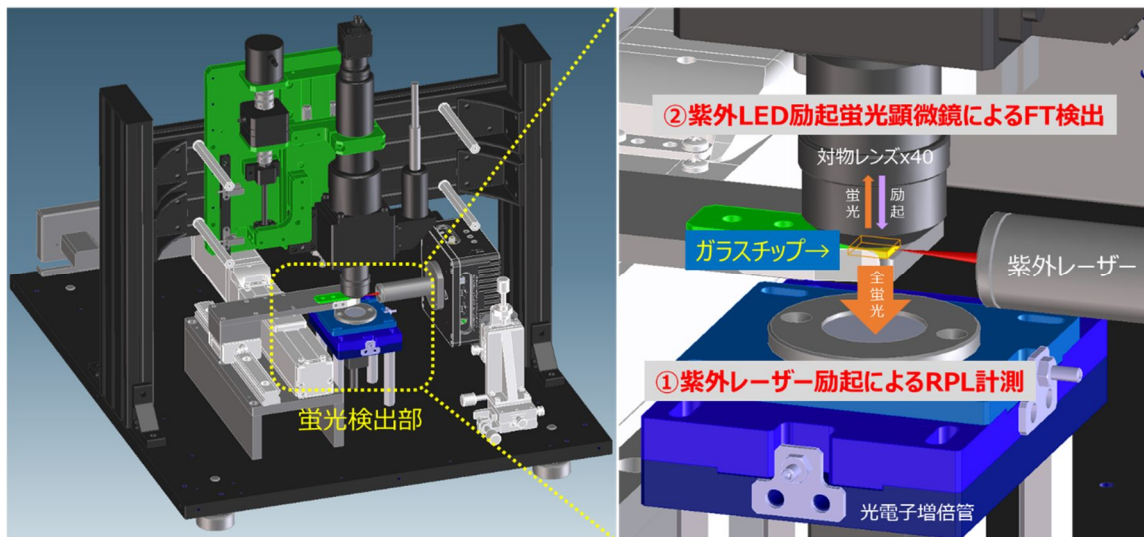


図4. 読み出し用リーダーの詳細設計.

5. まとめと今後の展開

深宇宙進出の第一弾として注目を浴びているアルテミス計画や月軌道プラットフォームゲートウェイの建設計画が着々と進んでいるにもかかわらず、深宇宙探査に向けた個人被ばく線量計測に関する議論は進んでいないのが現状である。本研究が提案するその場個人被ばく線量計測方式が実用化されれば、現在抱えている技術的課題を解決し、深宇宙への持続的な有人活動に向けた大きな転換をもたらすと期待される。この新しい線量評価方式に関するフェージビリティスタディを通じて作成した詳細設計を元に、今後プロトタイプ(実機)の製作に移行するとともに、当該線量評価方式を用いた宇宙実証実験を進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Naito Masayuki, Kodaira Satoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Considerations for practical dose equivalent assessment of space radiation and exposure risk reduction in deep space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13617
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-17079-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小平 聡	4. 巻 40
2. 論文標題 放射線の蛍光トラック計測技術	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ESI-NEWS	6. 最初と最後の頁 34-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小平 聡, 楠本 多聞, 北村 尚, 柳田 由香, 小口 靖弘
2. 発表標題 銀活性リン酸塩ガラスを用いた蛍光イオントラック計測
3. 学会等名 第34回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小平 聡
2. 発表標題 放射線の蛍光飛跡検出技術と応用研究
3. 学会等名 日本原子力学会 2022年春の年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小平 聡
2. 発表標題 宇宙放射線計測と防護技術
3. 学会等名 日本量子医科学会第1回学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小平 聡
2. 発表標題 宇宙環境における放射線被ばくと防護
3. 学会等名 2021年度日本写真学会オンライン年次大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内藤 雅之, 小平 聡
2. 発表標題 深宇宙探査に向けた宇宙放射線の遮へいによるリスク低減と今後の線量評価の課題
3. 学会等名 日本宇宙生物科学会第36回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小平 聡, 内藤 雅之, フウ クン, 楠本 多聞, 内堀 幸夫
2. 発表標題 深宇宙探査に向けたその場個人被ばく線量計測技術の開発
3. 学会等名 日本量子医科学会第2回学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤 雅之, 小平 聡
2. 発表標題 深宇宙進出に向けた宇宙放射線防護と線量評価の検討
3. 学会等名 日本量子医科学会第2回学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小平 聡, 内藤 雅之
2. 発表標題 宇宙放射線の線量評価や被ばくリスク低減に関する今後の課題
3. 学会等名 第35回固体飛跡検出器研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	内堀 幸夫 (Uchihori Yukio) (50342879)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・量子医科学研究所・所長 (82502)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	内藤 雅之 (Naito Masayukii)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学研究所・研究員 (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------