

宇宙放射線の被ばくを低減する 宇宙船素材の検討

小平 聡 内藤 雅之
Kodaira Satoshi Naito Masayuki

1. はじめに

宇宙における有人活動の場は、現在の国際宇宙ステーション (ISS) から月へと展開しつつあり、深宇宙探査が国際的に本格化している。ISS が周回する地球近傍と異なり^{1,2)}、深宇宙では宇宙放射線 (太陽や太陽系外から飛来する高エネルギーの陽子線や重粒子線) が直接降り注ぐ過酷な放射線環境であり、月面では地球上 (年間約 2.1 mSv 日本平均) に比べて 200 倍以上 (年間 420 mSv 程度) の被ばく線量になると試算されている³⁾。国際宇宙探査協働グループ (ISECG) のロードマップでは、月を足がかりとした火星への有人進出が示されている。したがって、年単位で地球への帰還ができない状況を想定し、持続的な深宇宙有人探査を可能とする宇宙放射線防護技術の確立が喫緊の課題であると言える。

地球低軌道では、地球の持つ磁場によって荷電粒子である宇宙放射線は部分的に遮られるが、固有磁場を持たない月や宇宙空間ではその減弱効果が小さくなる。米国の火星探査機マーズサイエンスラボラトリーによる地球から火星までの宇宙空間を移動中に観測した結果によれば、火星への往復だけで被ばく線量は 660 mSv に達すると報告されている⁴⁾。探査場所が遠くなるほど移動にかかる時間が長くなり、その場での滞在も含めると、宇宙空間で過ごす期間は年単位で長期化し、それに比例して被ばく線量が増大することになる。したがって、深宇宙探査時の被ばく線量をできる限り低減できる遮蔽材料の研究が重要になると考えられる。

2. 宇宙放射線の遮蔽方法

遮蔽材料は被ばく線量を減らす防護手法として地上において最もよく用いられており、例えばγ線は鉛のような質量の大きい元素で遮蔽すると効果的であることが知られている。基本的にどんな物質であっても数十 m 級の遮蔽厚さがあれば、宇宙放射線は十分に遮蔽可能であるが、宇宙船による宇宙空間の移動の場合そうはいかない。したがって、宇宙放射線と物質との相互作用に基づいた遮蔽戦略が必要になる。

宇宙放射線は高エネルギーの荷電粒子であるため、その減速は物質中での阻止能に従う。単位密度当たりの阻止能は物質の電荷・質量比 (Z/A) に比例するため、 $Z/A=1$ となる水素や水素を多く含む材料が荷電粒子を減速するのに効果的である。宇宙放射線に含まれる重粒子成分 (主に炭素～鉄) は電離密度が高いため人体への影響が大きいため、物質中の原子核との衝突によって、比較的軽い荷電粒子への破碎を利用することも効果的である。単位質量当たりの核破碎反応断面積は物質の平均質量数が小さいほど高くなる。これらのことから、平均質量数が小さく水素を含む物質 (例えばポリエチレンや水) が、宇宙放射線の遮蔽に適していると考えられる。なお、宇宙放射線の遮蔽能力を表す数値指標に基づいて、遮蔽材の組成から遮蔽効果を予測することができる⁵⁾。

宇宙放射線を構成する荷電粒子成分の内、存在比率で約 98 % は陽子・ヘリウムで占められているが、高エネルギーの陽子・ヘリウムは物質中の透過力が

高いために、阻止能に従って遮蔽するのは現実的でない。例えば、1 GeV の陽子・ヘリウムの水中飛程は約 3 m であり、それだけの厚さをもつ宇宙船を作るのは容易ではない。一方、炭素から鉄までの重粒子成分は存在比率で見ると約 2 % と非常に小さいが、線エネルギー付与 (LET) が大きいいため、実効線量当量として見たときには、**図 1** に示すように全体の 6 割程度を占めることになる。したがって、宇宙放射線の遮蔽戦略として、重粒子成分の核破碎反応による低 LET 化と低エネルギー成分 (< 100 MeV/n) の遮蔽材内吸収により、線量低減を図ることが望ましいと考えられる⁵⁾。

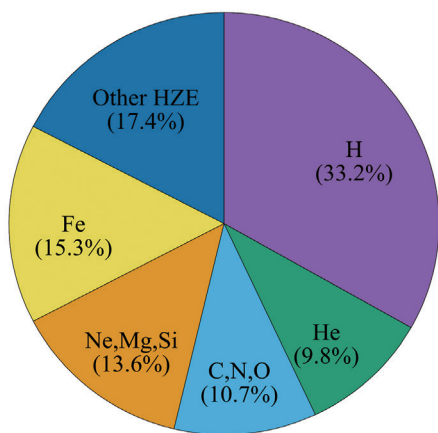


図 1 宇宙空間における宇宙線放射線の粒子成分毎の実効線量当量の寄与の割合 (ワーストケースの太陽活動極小期の場合)

3. 複合材料の遮蔽効果

宇宙放射線に対する遮蔽効果が高い物質はポリエチレンや水であるが、打ち上げペイロードの制約やコスト的な面、遮蔽材としてのハンドリングや安定性等の問題から有効な遮蔽対策は実現できていない。1つのアイデアとして、ISS内に常備されている入浴代替のウェットタオルの活用が検討された例があるが⁶⁾、容易に入れ替えができない深宇宙探査への適用は難しいと考えられる。そこで、遮蔽効果がある程度高くかつ宇宙船素材になり得る材料として、近年、自動車や航空機に多く採用されている炭素繊維強化プラスチックに代表される複合材料の検討を行った。複合材料は構成される元素の平均質量数が比較的小さいため、宇宙放射線の遮蔽にある程度効果があると予想される。**表**に示すような 8 種類の複合材料と比較用にアルミニウム (Al) とポリエチレン (PE) における遮蔽効果を加速器実験とシミュレーションにより検証した。

実験による評価では、遮蔽材と受動型線量計 (OSL (Al₂O₃:C) 線量計と CR-39 固体飛跡検出器の組み合わせ) をスタックした照射体に、重粒子線がん治療装置 HIMAC を用いて宇宙放射線を模擬した粒子ビーム (陽子, ヘリウム, 酸素, シリコン, 鉄) を実験上得られる各核種最大エネルギー (500 MeV/n 以下) で照射した。低 LET の陽子・ヘリウム線の吸収線量は OSL 線量計を用いて計測し、炭素核以

表 ビーム照射実験で使用した遮蔽材

遮蔽材	密度 (g/cm ³)	樹脂材	強化材	樹脂比率 (wt%)
Al (比較用)	2.7	----	----	----
PE (比較用)	0.94	----	----	----
PP SiC20 *	1.36	PP	SiC	53
PP SiC40 *	1.81	PP	SiC	30
PP C	1.17	PP	C	62
PE SiC	1.36	PE	SiC	53
CF/PI	1.43	PI	CF	70
CF/PEEK	1.62	PEEK	CF	33
CF/PP	1.31	PP	CF	33
CF/Epoxy	1.57	エポキシ**	CF	34

* SiC の体積含有率。 ** 樹脂材料非公開。PP: ポリプロピレン, CF: カーボンファイバー, PI: ポリイミド, PEEK: ポリエーテルエーテルケトン

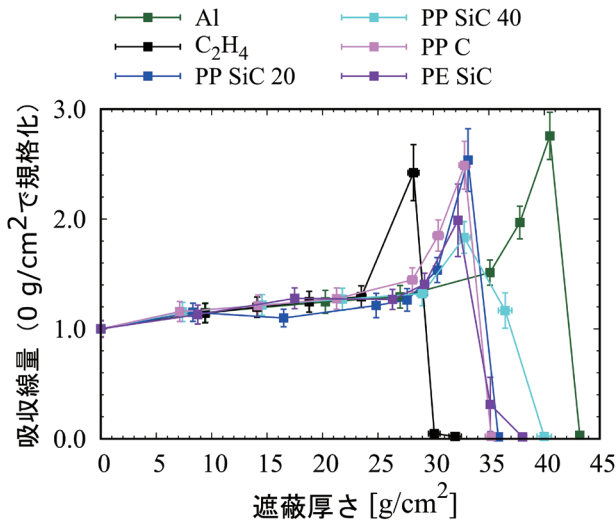


図2 各遮蔽材の厚さに対する陽子線の相対線量の変化

上の重粒子線の LET スペクトル並びに吸収線量は CR-39 を用いて計測した。炭素線以上の全吸収線量は2つの線量計データをマージして求めている⁷⁾。図2は実験結果の一例で、各遮蔽材の厚さに対する陽子線の相対線量の変化を表している。まさにブラッグカーブであり、そのピーク位置が減速効果を表しており、減速効果は Al < 複合材料 < PE であることが分かる。図3は鉄ビームが遮蔽材（この場合 PE）を通過前後の LET 分布の比較であり、通過した際に鉄核よりも軽い核（マンガン核以下）へと核破碎した様子を表している。各遮蔽材を通過後の鉄核の生残率を遮蔽材厚さ毎に調べた結果が図4になる。この傾きが核破碎反応断面積に対応しており、遮蔽材中での鉄核の壊れやすさを表している。減速効果と同様に壊れやすさも Al < 複合材料 < PE であることが分かる。更に照射実験の体系で Geant4 モンテカルロシミュレーションを行った結果、核破碎反応に関する計算値は実験値と概ね 10 % 程度で一致していることを確認した。特に宇宙放射線の中で最も LET が高く生物学的効果比が最も高くなる鉄線に対する遮蔽効果を計算すると、図5のように複合材料はアルミニウムよりも3~6割程度高いことが分かった⁸⁾。

更に宇宙船の構造材料であるアルミニウムから複合材料の1つで機械強度に優れた CF/PEEK に置き換えた場合の遮蔽効果について宇宙放射線全体に対してシミュレーションを行った。詳細は文献8)を参照されたいが、単位面積当たりの質量 (g/cm²)

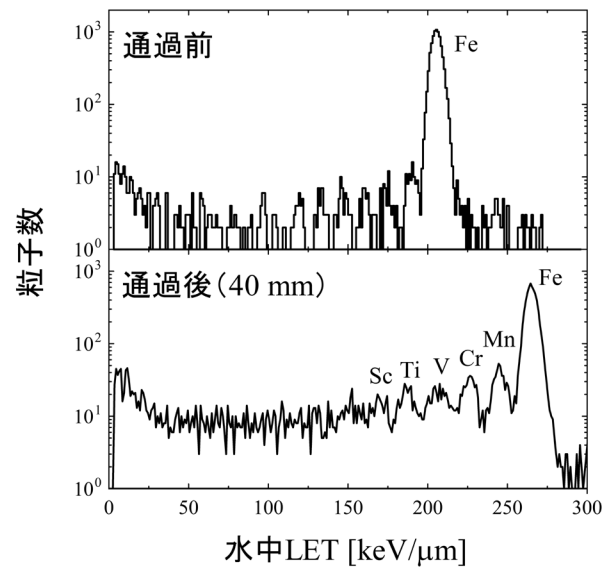


図3 鉄ビームが遮蔽材(PE)を通過前後の LET 分布の変化

鉄核 (Fe) から核電荷が1つずつ小さい核 (Mn, Cr, V, Ti, Sc...) に核破碎していることが分かる。通過前の鉄核ピーク以外は主に計測上のノイズ (遮蔽材以外のモニターや空気層から発生する核破碎粒子等) である

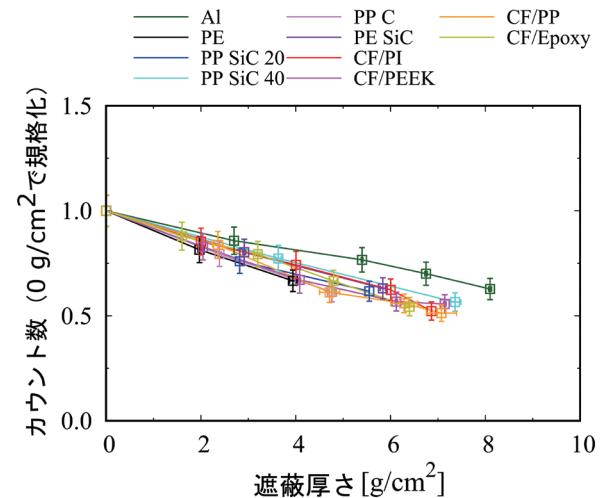


図4 各遮蔽材の厚さ毎の鉄核の核破碎反応後の生残率

が同じ場合の実効線量当量の減衰率を比較した結果、CF/PEEK の遮蔽効果はアルミニウムよりも2割程度高くなることが分かった。この場合、宇宙空間での被ばく線量に比べて船内においては5割程度低減されることになる。アルミニウムに比べて複合材料による線量低減効果はたかだか2割程度の違いに過ぎないが、長期的な宇宙滞在時の被ばくリスク (例えば発がんリスク) を可能な限り低減するという観点からは決して小さくはないであろう。

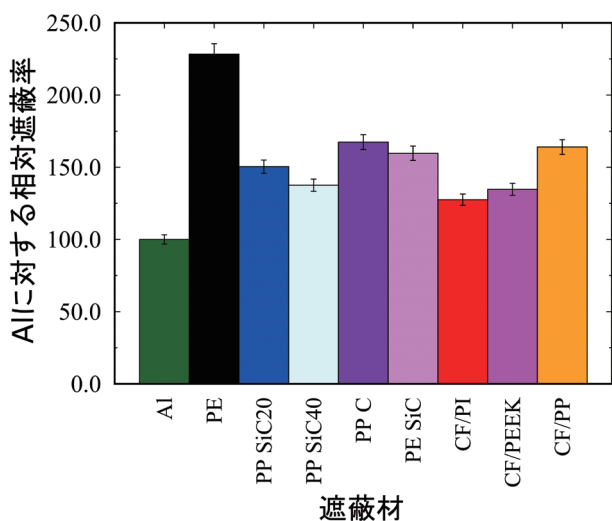


図5 鉄ビームが各遮蔽材（厚さ5 g/cm²）を通過した後の、実効線量当量の低減割合について、アルミニウムの場合と比較した相対遮蔽効果

4. おわりに

宇宙での有人活動は、地球から遠く離れた月や火星等の深宇宙に進みつつあると共に、民間企業による宇宙旅行も実現する等、ますます身近なものとなってきた。一方で、宇宙放射線による被ばく問題は避けられない課題である。複合材料を宇宙船の構造材料として用いれば、放射線防護を目的とした遮

蔽材を追加で積載することなく、被ばく線量の低減の可能性もある。本研究はその解決に向けた一歩と言え、今後より低減効果が高くなる設計と実装を進めていきたい。

謝辞

本研究は(国研)量子科学技術研究開発機構のQST未来ラボ宇宙量子環境研究グループと三菱重工業(株)との共同研究によって実施したものである。共同研究者の方々に感謝を申し上げる。宇宙放射線を模擬したビーム実験はQST重粒子線がん治療装置HIMAC（共同利用研究課題H398）において行われた。HIMAC関係各位に感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) E.R. Benton and E.V. Benton, *Nucl. Inst.Meth.*, **B184**, 255-294 (2001)
- 2) S. Kodaira, *et al.*, *Astrobiol.*, **21**, 1-6 (2021)
- 3) M. Naito, *et al.*, *J. Radiol. Prot.*, **40**, 947-961 (2020)
- 4) C. Zeitlin, *et al.*, *Science*, **340**, 1080-1084 (2013)
- 5) M. Naito, *et al.*, *Life. Sci. Space Res.*, **26**, 69-76 (2020)
- 6) S. Kodaira, *et al.*, *Adv. Space Res.*, **53**, 1-7 (2014)
- 7) T. Doke, *et al.*, *Radiat. Meas.*, **24**, 75-82 (1995)
- 8) M. Naito, *et al.*, *Life. Sci. Space Res.*, **31**, 71-79 (2021)

((国研)量子科学技術研究開発機構)