

宇宙放射線遮蔽材料の新規開発に向けた PHITS による検討

○後藤亜希、島崎一紀、木本雄吾、松本晴久、永松愛子 (宇宙航空研究開発機構)

PHITS Simulation for Development of Space Radiation Shielding Materials
Aki Goto, Kazunori Shimazaki, Yugo Kimoto, Haruhisa Matsumoto, and Aiko Nagamatsu (JAXA)

Key Words: Space Radiation, Radiation Shielding Materials, PHITS

Abstract

JAXA is planning future manned space missions following the International Space Station (ISS) mission, such as a long-term stay onboard lunar orbital station and exploration of the Moon and Mars. Outside the geomagnetic field, where the Moon/Mars missions will be performed, astronauts are exposed to high linear energy transfer (LET) radiations namely galactic cosmic rays (GCR) and solar energetic particles (SEP). As high-LET radiations cause significant biological damage, the development of radiation protection technologies is desired to safely carry out the future manned missions. Under this background, we undertake a study of space radiation shielding materials. In this paper, we introduce the PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System) simulation results of the shielding effects of hydrogen rich or multi-layer materials. Hydrogen is known as the most effective element for space radiation shielding. Then, hydrogen storage materials were selected as a candidate of hydrogen-rich shielding material. The shielding effects of the hydrogen storage materials such as ammonia borane (NH_3BH_3) and lithium borohydride (LiBH_4) against GCR/GCR+SEP were simulated by PHITS. As a result, the shielding effects of them were almost the same as polyethylene (PE), standard shielding material. Therefore, hydrogen storage materials are not more useful for space radiation shielding than PE. Additionally, the shielding effects of aluminium (Al, standard structure and shielding material for spacecraft)/resin 2-layer material against GCR/GCR+SEP were simulated by PHITS. Consequently, the shielding effects of Al/resin 2-layer material were higher than Al. This result suggests that materials consisting of low atomic number (Z) elements are effective for space radiation shielding.

1. 諸言

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、国際宇宙ステーション (ISS) に続く次世代有人探査ミッションとして、月周回宇宙ステーションの運用、有人月・火星面探査などを検討している。次世代有人ミッションの実現のために解決しなければならない課題の一つとして、宇宙放射線被ばくの問題が挙げられる。宇宙空間には、生体影響の大きい高 LET (linear energy transfer: 線エネルギー付与) 放射線が、太陽または太陽系外から常時飛来している。特に、月・火星が存在する地磁気圏外では、高い線量率で放射線が降り注いでいる。したがって、次世代有人ミッションの安全な実現には、宇宙飛行士の被ばく線量を低減する技術が必要不可欠である。

そこで我々は、平成 28 年度より宇宙放射線遮蔽材料に関する研究活動を開始した。本研究では、軽量かつ効果的な遮蔽材料の新規開発、並びに、地磁気圏外における次世代有人ミッションでの適用化を目指している。本稿では、本研究の概要¹、及び遮蔽材料新規開発に向けた放射線挙動シミュレーションについて述べる。

2. 宇宙放射線遮蔽材料研究の概要

2-1. 地磁気圏外における放射線環境

地磁気圏外での有人ミッションでは、宇宙に起源する放射線である一次宇宙線と、一次宇宙線と物質との相互作用により二次的に生成される二次宇宙線による被ばくを想定しなければならない。

一次宇宙線として、銀河宇宙線 (galactic cosmic ray: GCR) と太陽粒子線 (solar energetic particles: SEP) が挙げられる。GCR は、太陽系外から常時飛来しており、陽子 (~85%)、 α 粒子 (~14%)、電子 (~1%)、Li から U 核までの重核などからなる²。粒子の最大エネルギーは 10^{20} eV と想定されており、中でも数百 MeV/n から数 GeV/n までのエネルギーを有する核については人体への有害性が懸念されている。SEP は、太陽から突発的に飛来するものであり、大部分が陽子からなる³。SEP のエネルギー分布、フラックス、継続期間や発生頻度は、11 年周期の太陽活動などの因子により大きく変動する。大きな太陽フレアが発生した場合、SEP による被ばく線量が人の生命に関わる量に達する可能性がある。したがって、SEP のエネルギー、強度、及び継続時間の事前予測が求められているが、正確な予測が困難な部分も多いのが現状である。

二次宇宙線としては、一次宇宙線と宇宙機構成材料や月・火星面上の砂礫 (レゴリス) などが相互作用することにより生成する陽子、 α 粒子、中性子などを考慮しなければならない⁴。特に中性子は、被ばく線量に与える影響が大きく、遮蔽が困難であるため、問題視されている。

2-2. 地磁気圏外ミッションにおける放射線被ばく

月・火星が存在する地磁気圏外は、ISS が周回している地磁気圏内と比較し、高線量率であることが知られている。表 1 に地磁気圏外 (火星飛行時)、ISS 船内における線量率実測値を示す⁵⁻⁷。この値より、地磁気圏外ミッションでは ISS ミッションの 3 倍以上の線量の放射線を、単位時間あたりに被ばくす

る可能性があると言える。また、大規模な太陽フレアが発生した場合は、致命的な被ばく線量に達する可能性もある。

ここで、JAXA における宇宙飛行士の被ばく管理について述べる。JAXA では、ISS に長期滞在する日本人宇宙飛行士の被ばく管理のため、「国際宇宙ステーション搭載宇宙飛行士放射線被ばく管理規定」⁸を独自に制定している。現在の規定は、国際放射線防護委員会 (ICRP) の 2007 年勧告⁹を基に、平成 25 年 7 月に改定を行ったものである。本規定では、寄与生涯がん死亡確率に基づき、宇宙飛行士の生涯実効線量制限値を表 2 のように制定している。制限値は、初めて宇宙飛行を行った年齢や性別により異なるが、0.5~1.0 Sv としている。

月・火星有人ミッションは、放射線が高線量率で降り注ぐ環境で、長期的 (数百~千日間程度) に実施される計画である。これらのミッションにて、全ての宇宙飛行士がミッションを線量制限値の範囲内で安全に遂行するには、被ばく線量を低減する技術の構築が必要不可欠である。

表 1 宇宙空間における線量当量率実測値

ミッション・場所	線量当量率 (mSv/day)
火星飛行	1.84 ^a
ISS 船内 (参考)	0.59~0.62 ^b
地球上 (自然被ばく)	0.007 ^c

a NASA による Mars Science Laboratory (MSL) での 253 日間実測結果⁵

b JAXA による Area PADLES (Exp #1~3) での実測結果⁶

c 国連科学委員会 2008 年報告 (世界平均値)⁷

表 2 JAXA の定める ISS 宇宙飛行士の生涯実効線量制限値 (平成 25 年改正)⁸

初めて宇宙飛行を行った年齢	男性 (Sv)	女性 (Sv)
27~30 歳	0.6	0.5
31~35 歳	0.7	0.6
36~40 歳	0.8	0.65
41~45 歳	0.95	0.75
46 歳以上	1.0	0.8

2-3. 宇宙放射線遮蔽材料研究

被ばく線量を低減する手段の一つとして、有人宇宙船や月・火星面基地の壁面への放射線遮蔽材料の設置が挙げられる。有人ミッションで用いる遮蔽材料に対する要求を、3 点挙げる。まず第一に、高い線量低減効果を有することが求められる。遮蔽材料の設置により、放射線の線量を宇宙飛行士の健康被害が出ない量まで低減できなければならない。続いて、軽量であることが要求される。ロケットの打ち上げ能力には限界があるため、その搭載物 (ペイロード) の重量も制限されている。特に有人ミッションでは、生命維持装置や実験装置などの機器類、水や食品など、輸送を要する物品の重量が大きい。したがって、軽量の遮蔽材料、すなわち単位重量あたりの

線量低減効果の高い材料が求められている。さらに、安全性も重要な要求である。閉鎖空間における宇宙飛行士の健康を保持するため、有害ガス (オフガス) 発生量の少ない遮蔽材料が求められている。また、火災防止の観点から、難燃性であることも望まれている。以上、線量低減効果、重量、安全性の三要求を満たす遮蔽材料の開発が期待されており、さまざまな研究機関で長年研究がなされているものの、いまだ最善解が見出されていないのが現状である。

そこで我々は、宇宙放射線遮蔽材料の軽量化、高効率化に向けた研究を行っている。本研究では、(1) 水素リッチ材料、(2) 多層材料、(3) レゴリスを主材とした材料を軸とし、遮蔽材料としての有用性、製造可能性、ミッションでの適用可能性について調査する。各々の材料について、以下に示す。

水素リッチ材料

宇宙放射線の線量低減には、原子番号の小さい元素が有効であり、水素 (¹H) が最も有効であることが知られている¹⁰⁻¹²。水素は、核子あたりの電荷量が全元素の中で最大であるため、陽子や重核の線量低減に有効である。また、水素は中性子の弾性散乱による減速にも有効であり、自身は中性子を持たないため、二次的に発生する中性子の減速や低減についても効果的である。水素の重量濃度が高い材料として、ポリエチレン (PE; 水素重量濃度: 14%) が挙げられる。PE の宇宙放射線に対する線量低減効果は、計算や実験により示されている^{10,11}が、PE より線量低減効果の高い材料に関する報告はない。

そこで、我々は水素リッチ材料の新規創生可能性を調査している。水素重量濃度の高い材料の、線量低減効果や利用可能性について検討し、PE を超える軽量かつ効果的な遮蔽材料の開発を目指す。

多層材料

放射線と材料間の相互作用による線量低減効果は、材料の種類 (組成)、厚さ、形状などに依存する。したがって、人居住空間における線量低減を検討するには、外壁 (構造材料) を考慮した遮蔽設計の最適化が重要となる。

我々は、異種材料の多層化 (多層材料) による効果的な線量低減を検討している。材料の組合せ、厚み、設置順、形状などが線量低減効果に与える影響を明らかにし、線量低減に有効な宇宙船または人居住基地の設計を導出する (図 1)。

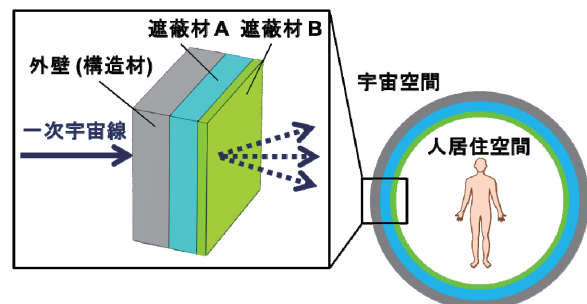


図 1 多層材料による効果的な線量低減模式図

レゴリスを主材とした材料

遮蔽材料の重量を低減する手段の一つとして、材料の現地調達が挙げられる。近年、月・火星面上レゴリスの遮蔽材としての利用に、関心が集まっている¹³⁻¹⁶。月レゴリスは金属酸化物の混合物(表3)であり、その宇宙放射線に対する線量低減効果が、シミュレーションや放射線照射試験結果から示されている¹³⁻¹⁵。しかしながら、月レゴリスは原子番号の比較的大きい金属元素を多く含むため、二次宇宙線の発生が懸念されている(図2)⁴。月レゴリスを遮蔽材料として適用するためには、一次及び二次宇宙線に対する線量低減効果の最大化が求められる。

JAXAでは、製造工程の工夫により、月レゴリスを主材としたコンクリート遮蔽材料を製作し、その線量低減効果を調査している¹⁶。線量低減効果の最大化、地上からの持ち込み物質(添加物)質量の最小化、宇宙飛行士による製作性の向上を目指し、さらなる条件検討を進める。

表3 アポロ14、アポロ16 ミッションで採取した月レゴリスの組成¹³

Material	Apollo sample 14163 (wt%)	Apollo sample 64501 (wt%)
SiO ₂	47.3	45.3
TiO ₂	1.6	0.37
Al ₂ O ₃	17.8	27.7
FeO	10.5	4.2
MgO	9.6	4.9
CaO	11.4	17.2
Na ₂ O	0.7	0.44
K ₂ O	0.6	0.1
MnO	0.1	0.056
Cr ₂ O ₃	0.2	0.09

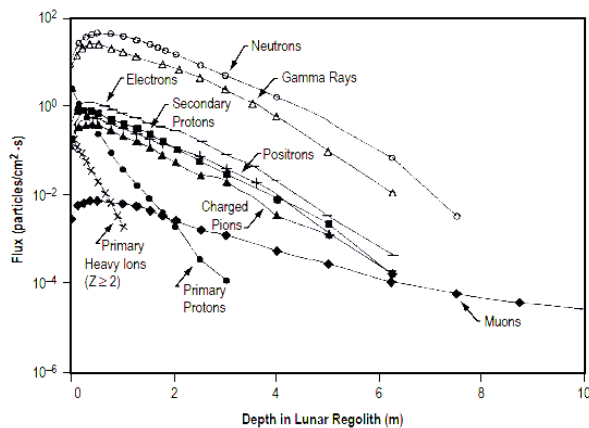


図2 GCR と月レゴリスの間の相互作用により発生する二次宇宙線計算結果⁴

以上に示した材料の、宇宙放射線遮蔽材料としての有用性を検討するため、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が開発する粒子・重イオン輸送計算モンテカルロコード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System)¹⁷ による放射線挙動シミュレーションと、加速器を使用した放射線照射試験から相補的なデータを取得している。以降では、水素リ

ッチ材料及び多層材料の新規開発に向けた PHITS シミュレーション結果を紹介する。

3. 宇宙放射線遮蔽材料の遮蔽シミュレーション

3-1. PHITS コード

PHITS は、物質中における粒子の輸送や崩壊を、核反応モデルや核データライブラリを用いて模擬する、3-D モンテカルロ計算コードである¹⁷。本稿における計算では、PHITS Ver. 2.87 コードを使用した。20 MeV 以下の中性子輸送については、Event generator mode Ver. 2 を使用した。

3-2. 水素貯蔵材の遮蔽効果

水素リッチ材料として、水素エネルギー利用において水素輸送に使用される水素貯蔵材に着目し、宇宙放射線に対する線量低減効果を調査した。水素貯蔵材として使用または研究されている物質・材料は数多く存在するが¹⁸、その中でも PE より水素重量濃度が高い、アンモニアボラン (NH₃BH₃; 水素重量濃度: 20 wt%) 及び水素化ホウ素リチウム (LiBH₄; 水素重量濃度: 19 wt%) について宇宙放射線に対する線量低減効果を、PHITS コードを用いたシミュレーションにて調査した。

計算体系を図3に示す。円柱状の水素貯蔵材 (NH₃BH₃, LiBH₄) に対し、円盤状の GCR または GCR+SEP 線源を一方方向から照射した場合の、水素貯蔵材後方に設置した水線量計の線量当量を求めた。線量当量は、吸収線量に ICRP60 で定義された放射線荷重係数 $Q(L)$ ¹⁹ を乗じたものである。遮蔽厚は、5、10、20 g/cm² とした。比較のため、同様の計算を基本遮蔽材である Al、PE についても実施した。線源の詳細については、3-4 項に示す。

なお、モンテカルロ計算のヒストリー数は、線源粒子あたり線量当量の統計誤差(標準偏差/線量当量平均値比)が 0.1 未満になるよう調整した。

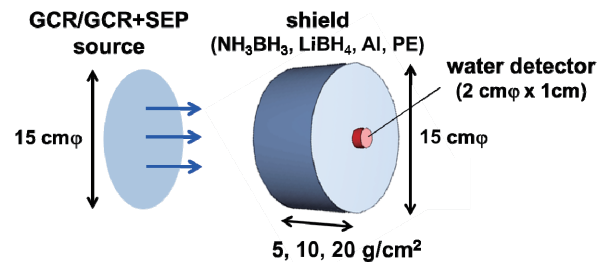


図3 水素貯蔵材 (NH₃BH₃, LiBH₄) 及び基本遮蔽材 (Al, PE) による宇宙放射線の遮蔽計算体系

3-3. Al/PE 二層材の遮蔽効果

宇宙船の外壁(構造材)は、一般的に軽量の金属であるアルミニウム (Al) からなる。Al 壁の一部をより原子番号の低い(低 Z) 元素からなる材料(有機材料など)に置換した場合、より効果的に線量低減が可能になる可能性がある。

有機材料の中で最も線量低減に有効であるものは、先に示した通り PE である。そこで、Al/PE 二層材

の宇宙放射線に対する線量低減効果を、Al 単体及び PE 単体と比較した。

計算体系を図 4 に示す。円柱状の Al/PE 二層材に対し、円盤状の GCR または GCR+SEP 線源を一方から照射した場合の、水線量計の線量当量を求めた。Al と PE の遮蔽厚の面密度比を 1 とし、全体の遮蔽厚は 5、10、20 g/cm² とした。設置順の影響について把握するため、線源に対して PE、Al の順に設置した二層材 (PE/Al 二層材) についても同様の計算を実施した。さらに、比較対照として、Al 単体及び PE 単体についても計算を行った。線源の詳細については、3-4 項に示す。

なお、モンテカルロ計算のヒストリー数については、3-2 項に示す通りである。

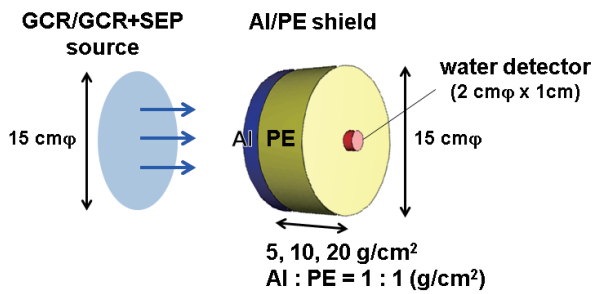


図 4 Al/PE 二層材による宇宙放射線の遮蔽計算体系

3-4. 宇宙放射線モデル

PHITS シミュレーションにおける宇宙放射線 (GCR 及び GCR+SEP) 線源として、CREME96 モデル²⁰を使用した。GCR 及び GCR+SEP 線源スペクトルを図 5 及び 図 6 に示す。GCR 線源については、太陽状態を太陽活動極小期 (フレアなし) 条件とした。また、GCR+SEP 線源は、太陽状態を最悪日 (1989 年 10 月 20 日フレア) 条件とした。GCR 及び GCR+SEP 線源ともに、宇宙機位置は地球近傍惑星間条件とした。線源原子核は、10⁰~10⁵ MeV/n の水素核 (¹H) からニッケル核 (⁵⁸Ni) までとした。なお、図 5 及び 図 6 における青線は、水素 (¹H)、ヘリウム (⁴He)、炭素 (¹²C)、窒素 (¹⁴N)、酸素 (¹⁶O)、鉄 (⁵⁶Fe) を除く核のスペクトルである。

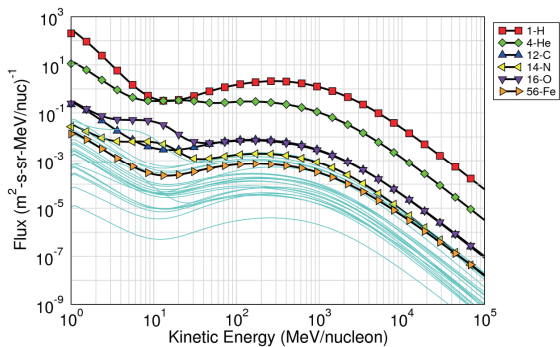


図 5 GCR 線源 (H-Ni 核) スペクトル (CREME96 太陽活動極小期 (フレアなし)、地球近傍惑星間条件)

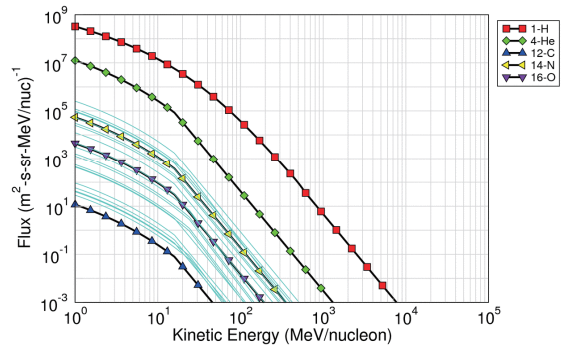


図 6 GCR+SEP (H-Ni 核) 線源スペクトル (CREME96 太陽最悪日 (Worst day; 1989.10.20)、地球近傍惑星間条件)

4. 結果と考察

4-1. 水素貯蔵材の遮蔽効果

水素貯蔵材 (NH₃BH₃ 及び LiBH₄)、Al、PE に GCR 線源または GCR+SEP 線源を照射した際の、水線量計の線量当量計算結果を図 7 に示す。

水素貯蔵材は、Al と比較し、GCR 及び GCR+SEP 線源照射時の水線量計の線量当量が低かった。すなわち、水素貯蔵材は、Al よりも宇宙放射線源に対する単位重量あたりの線量低減効果が高いことが示唆された。しかしながら、水素貯蔵材の線量低減効果は PE と同程度であった。

水素貯蔵材は PE よりも水素重量濃度が高いにも関わらず (水素重量濃度: NH₃BH₃ 20wt%、LiBH₄ 19 wt%、PE 14 wt%)、PE と同程度の線量低減効果であった原因として、水素貯蔵材の質量あたり電荷量が PE と同程度であるためと考えている。宇宙放射線の線量低減には、二次中性子の減速や低減の観点から、水素重量濃度の高い材料が望ましい。これに加えて、荷電粒子の線量低減の観点から、材料の分子量あたり電荷量 (charge-to-mass) が高いことも求められる。NH₃BH₃、LiBH₄、PE の分子量あたり電荷量は、それぞれ 0.58、0.55、0.57 であり、互いに大差ない。したがって、これらの GCR 及び GCR+SEP 線源に対する線量低減効果が同程度であったと考えられる。

以上の計算結果より、既存の水素貯蔵材の宇宙放射線遮蔽材料としての適用化は、有益でないと言える。室温大気圧下で安定な物質で、PE より水素重量濃度及び分子量あたり電荷量の高いものが存在すれば、宇宙放射線の線量低減に有効であるものと考えられる。しかしながら、既存物質の中で、そのような特性を有するものはない。また、化学結合の特性上、新規合成することも困難と考えられる。宇宙放射線の効果的な線量低減には、水素リッチな材料の設置が有効であるものの、材料への水素導入可能量には限界がある。したがって、設置する遮蔽材料の種類 (組成) のみに注目するのではなく、宇宙船または人居住基地システムで使用する全ての材料を考慮した、遮蔽設計の検討が必要と考えられる。

4-2. Al/PE 二層材の遮蔽効果

Al/PE 二層材 (Al/PE 及び PE/Al)、Al、PE に GCR 線源または GCR+SEP 線源を照射した際の、水線量計の線量当量計算結果を図 8 に示す。

Al/PE 二層材は、Al 単体と比較し、GCR 及び GCR+SEP 線源照射時の水線量計の線量当量が低かった。すなわち、Al/PE 二層材は、Al 単体よりも、宇宙放射線源に対する単位重量あたりの線量低減効果が高いことが示唆された。また、照射線源にて比較した場合、GCR+SEP 線源の方が GCR 線源よりも二層化 (Al の低 Z 化) による線量低減効果増大の影響が大きかった。また、二層材の設置順にて比較 (Al/PE 及び PE/Al) した場合、設置順は GCR 及び GCR+SEP 線源に対する線量低減効果に大きく影響を与えなかった。以上により、宇宙船または人居住基地外壁の低 Z 化は、宇宙放射線 (特に SEP 環境下) の線量低減の観点において有効であることが示された。

GCR+SEP 線源照射時の方が GCR 線源照射時よりも二層化 (Al の低 Z 化) による線量低減効果増大の影響が大きかった因子として、線量低減可能な粒子の線源中存在比が挙げられる。線源粒子の中でもフラックスが最も大きい陽子のうち、約 150 MeV 未満のものは厚さ $\sim 20 \text{ g/cm}^2$ の材料で線量低減できるのに対し、150 MeV 以上のものは材料を貫通するため、線量低減が困難である。GCR+SEP 線源の方が、GCR 線源より低エネルギー陽子線の割合が大きいため、前者を照射した場合の方が材料組成が線量低減効果に与える影響が大きかったものと考えられる。

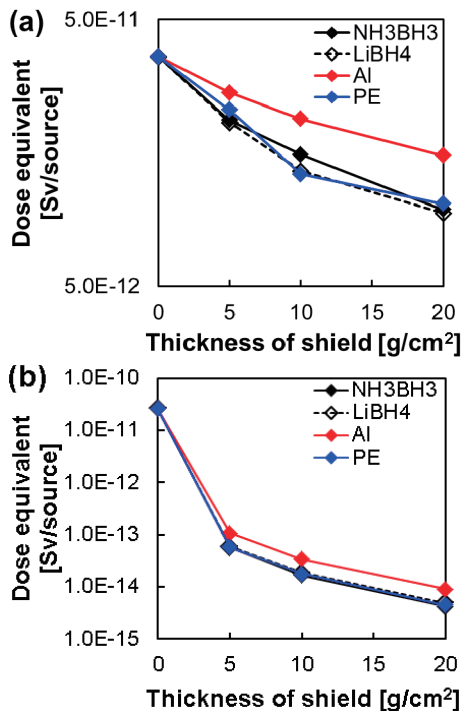


図 7 水中線量当量の線源粒子あたり平均値の遮蔽材料厚依存性: 水素貯蔵材 (NH₃BH₃ 及び LiBH₄)、PE、Al に対し (a) GCR 線源照射及び (b) GCR+SEP 線源照射

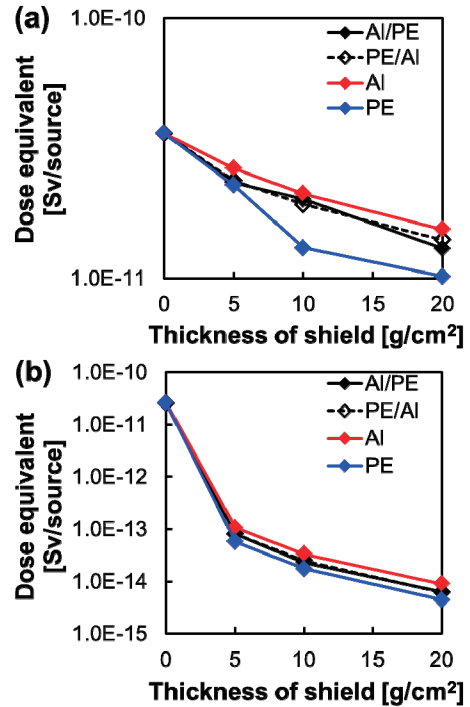


図 8 水中線量当量の線源粒子あたり平均値の遮蔽材料厚依存性: Al/PE 二層材 (Al/PE 及び PE/Al)、PE、Al に対し (a) GCR 線源照射及び (b) GCR+SEP 線源照射

5. まとめ

我々は、地磁気圏外における次世代有人ミッションの安全な実現を目指し、宇宙放射線遮蔽材料に関する研究を行っている。今回、軽量かつ効果的な遮蔽材料の新規開発に向け、水素貯蔵材及び Al/PE 二層材について、PHITS コードを使用した遮蔽シミュレーションを実施した。既存の水素貯蔵材の中でも特に水素重量濃度の高い、NH₃BH₃ 及び LiBH₄ の宇宙放射線に対する線量低減効果は、PE と同程度であることが示唆された。したがって、既存の水素貯蔵材の宇宙放射線遮蔽材料としての適用化は、有益でないとと言える。また、Al/PE 二層材の宇宙放射線に対する線量低減効果は、Al 単体よりも高いことが示唆された。宇宙船または人居住空間外壁 (構造材) の低 Z 化は、効果的な線量低減に有効であるものと考えられる。

以上より、宇宙放射線を効果的に線量低減するには、設置する遮蔽材料の種類 (組成) のみに注目するのではなく、宇宙機システムを構成する全ての材料を考慮した遮蔽設計の最適化が重要と言える。

6. 謝辞

水素貯蔵材に関する助言を頂いた東北大学折茂慎一教授、佐藤豊人助教に感謝いたします。

7. 参考文献

- 1) Goto, A. et al., Introduction of Research Activities for Space Radiation Shielding Materials, Proceedings of 59th Space Sciences and Technology Conference, 4281, 2016.
- 2) McKenna-Lawlor, S. et al., Recommendations to mitigate against human health risks incurred due to energetic particle irradiation beyond low earth orbit/BLEO, Acta. Astronaut. 109, 182-193, 2015.
- 3) Durante, M., Physical basis of radiation protection in space travel, Rev. Mod. Phys., 83, 1245-1281, 2011.
- 4) Adams Jr, J. A., Hathaway, D. H., Grugel, R. N., Watts, J. W. et al., Revolutionary Concepts of Radiation Shielding for Human Exploration of Space, NASA/TM-2005-213688, 2005.
- 5) Zeitlin, C. et al., Measurements of Energetic Particle Radiation in Transit to Mars on the Mars Science Laboratory, Science 340, 1080-1084, 2013.
- 6) Nagamatsu, A. et al., Area radiation monitoring on ISS Increments 17 to 22 using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo, Radiat. Meas. 59, 84-93, 2013.
- 7) UNCEAR 2008 Report Vol. 1, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2008.
- 8) JAXA: 国際宇宙ステーション搭乗宇宙飛行士放射線被ばく管理規程 (2013 年改正).
- 9) ICRP: Publication 103, Ann. ICRP 37, 2007.
- 10) Thibeault, S. A. et al., Nanomaterials for radiation shielding, Mrs. Bull., 40, 836-841, 2015.
- 11) Vuolo, M. et al., PERSEO, Personal Radiation Shielding for Interplanetary Missions Final Report, ESA general studies programme, 4000111396, 14-S-06, 2015.
- 12) Durante, M., Space radiation protection: Destination Mars, Life. Sci. Space. Res., 1, 2-9, 2014.
- 13) Pham, T. T. et al., Dose estimates in a lunar shelter with regolith shielding, Acta. Astronaut., 64, 697-713, 2009.
- 14) Montes, C. et al., Evaluation of lunar regolith geopolymer binder as a radioactive shielding material for space exploration application, Adv. Space. Res., 56, 1212-1221, 2015.
- 15) Miller, J. et al., Lunar soil as shielding against space radiation, Radiat. Meas. 44, 163-167, 2009.
- 16) JSSP 科研費 JP26506032 「宇宙放射線に対する効果的な遮蔽材料と被ばく線量評価手法の確立 (永松愛子)」
- 17) Sato, T. et al., Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923, 2013.
- 18) McWhorter, S. et al., Moderate Temperature Dense Phase Hydrogen Storage Materials within the US Department of Energy (DOE) H₂ storage Program: Trends toward Future Development, Crystals 2, 413-445, 2012.
- 19) ICRP: Publication 103, Ann. ICRP 37, 2007.
- 20) A. J. Tylka et al., CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code, IEEE Trans. Nucl. Sci. 44, 2150-2160, 1997.