

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26506032

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Study for Space Radiation Protection with Effective Shielding Techniques for Human Exploration

研究代表者

永松 愛子（NAGAMATSU, AIKO）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・有人宇宙技術部門・主幹研究開発員

研究者番号：00421868

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙飛行士の軌道上での滞在期間は、被ばく線量によってのみ制限されるため、宇宙飛行士の長期滞在化には、宇宙放射線による被ばく線量の低減が最も重要な課題である。

加速器照射試験、低地球軌道（LEO）のISS「きぼう」の船内および船外の実測結果から構築したシミュレーション解析から、ISS「きぼう」と同等の遮蔽を持つ球体仮想宇宙船のLEO、月面、地磁気圏外（BLEO）での被ばく線量は、深宇宙での被ばく線量はLEOの3倍、月面環境は2.4倍であった。最も遮蔽効果のあったポリエチレン15 g/cm<sup>2</sup>を宇宙船内壁に付加すると、LEOでは30%低減、BLEOでは22%の線量を低減できることが分かった。

研究成果の概要（英文）：Strategies for reducing radiation dose are vital on Ultra-long stay for human space exploration, because expedition duration for each astronaut is restricted by the career dose limit due to space radiation. We conducted dose estimations using virtual modules with the equivalent thickness of a ISS KIBO hull in LEO/BLEO/Moon. This simulation system is incorporated with the results from ground performance tests, space experiments outside/inside of ISS. Following results are obtained:

- Doses in BLEO are increased by 3 times than those in LEO,
- By adding with polythene 15 g/cm<sup>2</sup>, dose equivalents decreased by 30% in LEO and 22% in BLEO.

研究分野：宇宙放射線物理

キーワード：宇宙放射線 宇宙飛行士 被ばく管理 国際宇宙ステーション 有人探査 放射線防護 遮蔽 PADLES

## 1. 研究開始当初の背景

2025年以降、月・火星における有人滞在ミッションの検討が開始されているが、地磁気圏外での月・火星等の有人惑星探査では、LEOよりも数倍以上高い線量が実測され、国際宇宙ステーション（ISS：International Space Station）よりも許容可能な搭乗期間を短縮するか、被ばく線量をできる限り低減できる手段を講じる必要がある。ISSが飛行するLEOでの宇宙放射線環境は、銀河宇宙線（GCR：galactic cosmic ray）、地球磁場に捕捉された陽子線、太陽活動によって生じる太陽粒子線が360度あらゆる方向から入射し、地上では存在しない混合放射線場である。これらの一次線源は、ISS船壁や内部の搭載ラックや構造物を通過することによって、中性子を発生させる。一般的な遮蔽の考え方として、透過力の高い放射線に対しては元素番号（Z）の高いものが有効である。しかし、様々なエネルギーを持つ宇宙放射線との相互作用および核反応においては、ある深部では二次線源（中性子）をより発生させてしまい、かえって深部線量当量を高くする可能性がある。線源・線種とそのエネルギー範囲が幅広い宇宙放射線の全構成粒子に対する効果的な遮蔽のメカニズム解明や、材料の選定・開発ははまだ十分なされていない。宇宙放射線に対する効果的な遮蔽材料の検討には、まず、(1)宇宙放射線環境（被ばく線量や線エネルギー付与分布）を詳細に把握し、(2)遮蔽材料の特性を生かした線量低減させるためのメカニズムを理解し、(3)滞在モジュールやクルークオーター（睡眠区画）の遮蔽設計を検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

宇宙放射線に対する遮蔽防護技術の確立は、人類が低地球軌道（LEO：Low Earth Orbit）以遠の宇宙へ進出するために必須の研究課題である。有人宇宙探査ミッションにて、生涯被ばく線量制限値を超えず、宇宙飛行士が地球に帰還できる宇宙放射線遮蔽技術を確認することで、①、②の実現が可能となる。

①有人宇宙探査ミッションにて、生涯被ばく線量制限値を超えず、宇宙飛行士が地球に帰還できる宇宙放射線遮蔽技術を確認。

- ・生涯被ばく線量制限値を考慮したミッション計画期間の妥当性評価
- ・有人惑星探査用モジュールの形状設計や材料の工夫による最適遮蔽設計
- ・有人惑星探査のための新たな被ばく管理システムの構築

②遮蔽防護に関する付随技術（シミュレーション構築や線量計測）の高精度化により、評価や測定のマージンを減らし、日本人宇宙飛行士の長期滞在を実現。

## 3. 研究の方法

宇宙放射線被ばく線量への寄与が高い陽子線および二次粒子線である中性子に特化した線量低減のメカニズムを詳細に理解し、効果的な遮蔽のための材料の組み合わせを検討するために、ISS船内での線量計測結果に基づき構築した「宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル」を使って検討を開始する。

高精度な宇宙放射線計測技術の構築およびシミュレーションモデルとのベンチマークは、各国宇宙機関においても始められたばかりであるが、提案者らは世界に先駆けて両者の高精度化を行ってきた。これまで、モデルによって評価解析した遮蔽材を打ち上げ、その遮蔽効果を定量的に評価する宇宙実験は実施されていない。加速器等を用いた照射実験では、単一エネルギー・粒子による照射しかできず、混合放射線種への遮蔽効果を十分な評価ができない。本研究では「宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル」を用い、以下のA~Cの点を明らかにする。

A. 線量低減のメカニズムをシミュレーションモデルを使って解明。候補となる遮蔽材料の厚さや組み合わせを変えてISS船壁内に付加し、太陽活動最小期および最大期の被ばく線量を評価する。

B. 「複数の遮蔽材料の効果的な組み合わせ」による遮蔽効率の向上をめざし、搭載安全性が高くかつ線量寄与の高い陽子線および二次粒子線である中性子に特化した遮蔽材料物性評価と選定のためのシミュレーションモデル詳細解析。

C. 宇宙実験による遮蔽材料と遮蔽効果の定量評価・国際協力

本研究計画の実施にあたり Step:1-5 のステップ（3年間、平成26-28年度）を計画した。本研究は、深宇宙探査のための次世代有人宇宙船構築や居住モジュール構築のための遮蔽防護技術に直結し、新しい航空産業技術の基盤となる。航空宇宙分野（商業利用での高高度航空飛行や宇宙ホテル）や放射線医学分野（粒子線治療場等）での遮蔽影響研究および混合放射線場に対する人体への放射線リスクの低減にも期待できる。

## 4. 研究成果

Step1: 「宇宙放射線被ばくシミュレーションモデル」の実測結果に基づく構築【平成26年度】

遮蔽情報や寸法、重量、内部構造部情報を組み込んだ計算解析用バーチャルISS「きぼう」（図1右）、ISS「きぼう」全体の「きぼう」の平均遮蔽厚（アルミ22.67g/cm<sup>2</sup>）を持つ球体構造の仮想宇宙船（図1左）を、「宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル」にインプットし、付加する船壁厚や材料を可変にして計算できる体系構築を行った。本モデルへのインプットソースである宇宙線モデルについては、銀河宇宙線、捕捉陽子、

地磁気モデルの最新版コードを組み込み、計算環境を構築した。

体系①(きぼうと同じ遮蔽厚を持つ球体仮想宇宙船)  
 ・直径400cm, Alで構成  
 ・宇宙船内部は空気で充填。  
 ・被ばく線量を計測する検出器は直径30cmの水球。



体系② LEO, BLEOおよび月面の線量計算  
 ・Al, ラック, エアロック等を図面, 重量, 寸法から再現  
 ・ラック重量, 寸法を再現  
 ・宇宙船内部は空気で充填。  
 ・被ばく線量を計測する検出器は直径30cmの水球。

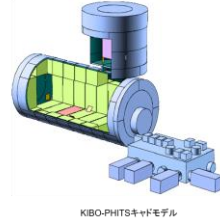


図1 シミュレーションモデルに用いた遮蔽体系

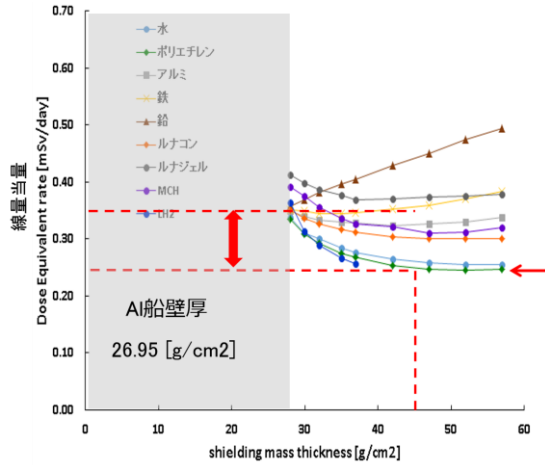
## Step2: 遮蔽材料の基礎データの取得と組み合わせ物性評価【平成26、27年度】

平成26年度に構築した「宇宙放射線被ばく線量シミュレーションモデル」と「きぼう」の平均遮蔽厚を持つ仮想宇宙船の計算体系を用いて、基本遮蔽材料(水、ポリエチレンブロック、アルミ、鉄、鉛)の厚さを変えた遮蔽材(1~30g/cm<sup>2</sup>)を船内壁に付加し、太陽活動最小期および最大期の中心部の被ばく線量を評価した。これらの計算結果から、宇宙放射線の構成粒子である陽子および重荷電粒子に対する遮蔽について、図2に示す通り、以下の知見が得られた。

この結果に基づき、効果的な遮蔽材料のひとつとして、日本独自の新しい宇宙用遮蔽材の構築を試みた。平成26年度に疑似月面土壌成分(構成成分がもっとも近いFJS-1シミュラント)を用いた①コンクリート(ルナコン)、②ジェル形状(ルナジェル)を重合・製作した。①については、より線量低減に寄与できるように製造方法を工夫し、従来のコンクリートより残留水成分が高くなっている。核反応を起こしやすく陽子・中性子に対する遮蔽効果が期待できる。②については、宇宙実験への搭載性を考慮して、形状加工がしやすい組成比を検討した。

- ー 陽子: 鉛以外では、どんな材料を使用しても~15g/cm<sup>2</sup>(球体仮想宇宙船全体の船壁としては6トンの重量追加)までの遮蔽材付加では~40%程度吸収線量が低下する、10keV/μm以下の線量に対して効果が高い。
- ー 重荷電粒子: 15g/cm<sup>2</sup>からさらに遮蔽厚を追加しても、二次粒子の発生により遮蔽厚の増加共に深部線量が上昇し、有効な遮蔽効果は得られない。

平成27年度は、新しく重合した疑似月面土壌成分の遮蔽材料とともに、水やポリエチレンブロックをつかった陽子(70~230MeV/n)の照射実験を行い、これらの遮蔽材料の遮蔽能を定量的に評価した(図3)。線量評価には、熱蛍光線量計TLDと固体飛跡検出器を封入したPADLES線量計<sup>(1)</sup>を使用している。



2016 研究推進委員会「有人惑星探査ミッションに向けた放射線防護技術の確立」JAXA 有人 永松 2016.3 応用物理学会

遮蔽材: 厚さ(g/cm <sup>2</sup> ): 1~30まで付加	
①	水(1.00 g/cm <sup>3</sup> )
②	ポリエチレン(0.90 g/cm <sup>3</sup> )
③	Al(2.70 g/cm <sup>3</sup> )
④	鉄(7.8 g/cm <sup>3</sup> )
⑤	鉛(11.3 g/cm <sup>3</sup> )
⑥	液体水素(LH2)(0.0695 g/cm <sup>3</sup> )
⑦	メチルシクロヘキサン(MCH)(0.769 g/cm <sup>3</sup> )
⑧	レゴリス_コンクリ(2.095 g/cm <sup>3</sup> )
⑨	レゴリス_ジェル(1.342 g/cm <sup>3</sup> )

図2 低地球軌道における遮蔽材料追加による線量変化

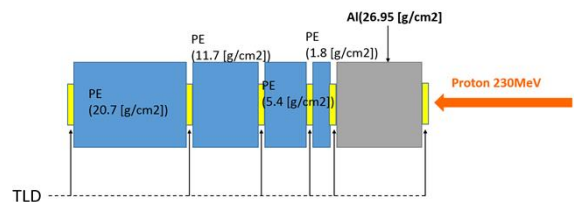
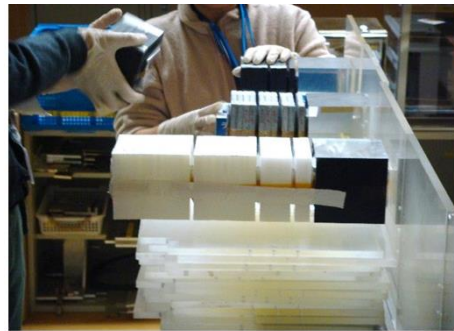


図3 低地球軌道における遮蔽材料追加による線量変化

荷電粒子を主成分とする宇宙放射線に対しては、質量阻止能比や核反応断面積観点から、水素原子を多く含む遮蔽材が最も有効であると考えられており、今回のシミュレーション結果もこれを支持している。シミュレーション結果から、いかに宇宙放射線の構成成分の中で存在比の高い陽子成分を遮蔽出来るかがポイントであることがわかった。そこで、放医研のHIMACにて銀河宇宙線の代表成分の一つである230MeV陽子をAl + PEに照射しブラッグカーブを得た。照射実験の結果から、ポリエチレンの厚さが約11.7[g/cm<sup>2</sup>]で最も線量を落とすことがわかった。実験値

とシミュレーション値は同程度の厚みが得られた(図4)。ただし、宇宙線陽子は幅広いエネルギーを持っており、エネルギー分布ごとにこのようなカーブで線量付与をしていたため、実宇宙放射線環境では外部からのエネルギー分布に依存して、このピークが前後すると予想される。

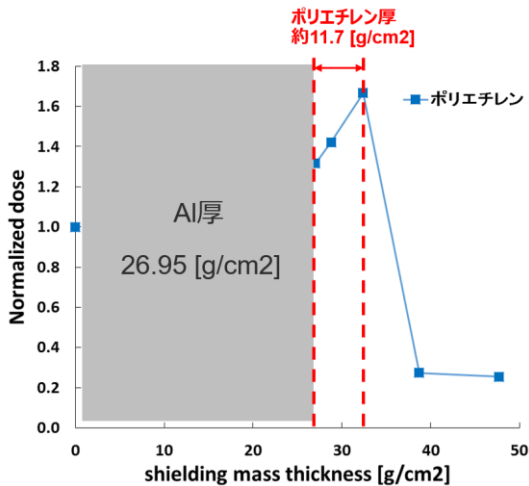


図4 地上加速器を用いた陽子(70~230MeV/n)に対する遮蔽材料追加による線量変化

### Step3:ISS 搭載用遮蔽球体構造の設計検討と宇宙実験による遮蔽効果の定量評価検討【平成26、27年度】

2008年から、ISS「きぼう」船内の17か所に、受動積算型線量計 PADLES を定期的に設置・交換して、継続的な定点環境モニタリング実験(Area PADLES<sup>(1)</sup>)を実施している。しかし、「きぼう」船壁厚よりも厚い領域しか測定することはできない。また、船内と船外を同時に、被ばく線量に寄与するエネルギー領域全体を高精度で測定した実験は、これまで実施されていない。

船壁厚よりも薄い領域での宇宙放射線の挙動および遮蔽メカニズムを把握するために、ISS「きぼう」曝露部に設置されたロボットアーム先端に1気圧保持した特殊ケースに封入した受動線量計 Free-Space PADLES を設置し、船外の遮蔽がごく薄い領域での曝露環境での被ばく線量計測を立案し、宇宙実験を行った。Free-Space PADLES は、アルミの船壁厚(上部ケース0.3~4mm、下部支持台MPEPは共通で27mm)を変えた8種類のケースから構成される(図5)。

線量計は、①曝露部搭載用、②軌道上コントロール用、③地上対照用の3種類があり、①、②をISS「きぼう」へ搭載した。3種類の差し引きから、曝露期間のみ、ISS「きぼう」保管位置での船内のみの線量を算出し、③も用いて輸送中の線量を差し引いて補正する。

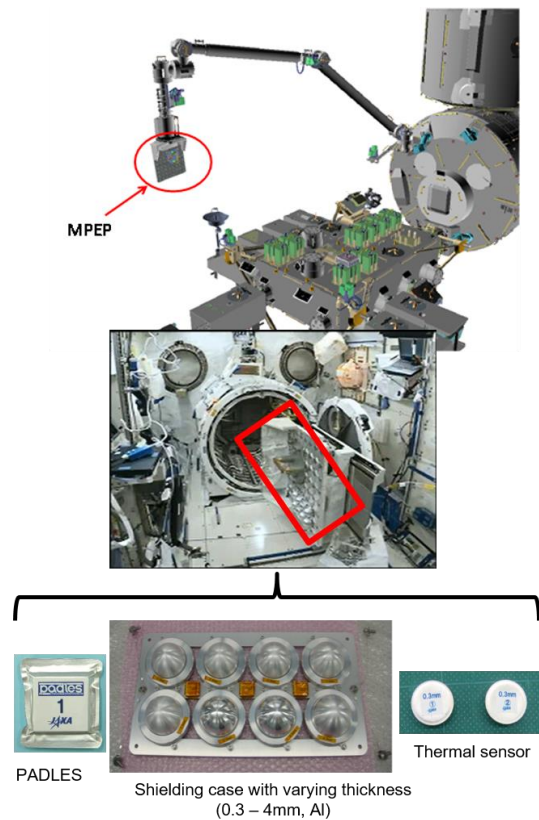


図5 ISS「きぼう」曝露部のロボットアームで実験された曝露放射線環境の計測実験 Free-Space PADLES

Free-Space PADLES 線量計は、2015年4月10日にSpx-6で打ち上げられ、軌道上に240日間保管後、12月11日43Sソーズで回収された。軌道上保管中、①の曝露部搭載用線量計は、2015年6月1日~14日までの14日間ロボットアーム先端に搭載された。14日間の平均飛行高度は407.7km、曝露部搭載温度は、-12.0 to +2.1℃の間を変動した。

同時に計測された曝露部(船外)と船内の被ばく線量の解析結果を図6に示す。

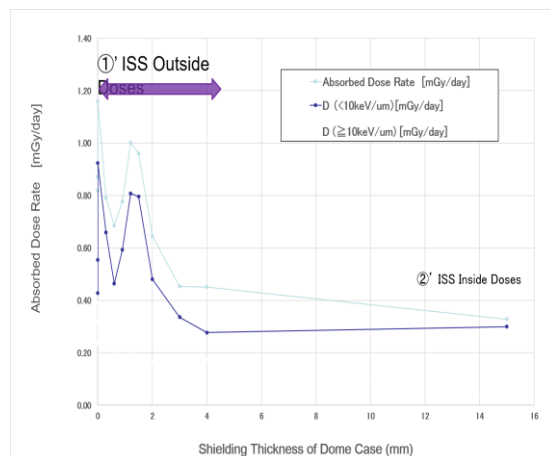


図6 船壁厚(mm)に依存した吸収線量(mGy)の変化

曝露部に設置された、最も上部ケースの遮蔽厚が厚い4mmケースと薄いケース0.3mmに封入された線量結果を比較すると、0keV/um < LET < 100keV/umの中~高LETの線量付与領域では、17.2倍。100keV/um以

上の高 LET 領域では 7.4 倍の差があった。

#### Step4:ISS における宇宙実験計画の立案と国際協力検討の構築【平成 28 年度】

2025 年以降の有人探査に向け、ISS の環境計測だけではなく、曝露部を用いた探査に向けたテストベッドとした活用や遮蔽材の線量低減効果を見るための実測場所としての利用について、Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station 国際会議の場でアイデア検討を行った。また、次年度以降、将来探査及び遮蔽防護に関するセッションを加えた本会を日本（つくば）で開催するために、WS 開催事務局担当および準備に向け、国際会議用の HP の作成を行った。

#### Step5:効果的な深宇宙での被ばく管理と被ばく線量低減に向けた戦略の検討【平成 28 年度】

Step1-4 では、地上での加速器照射試験の体系、低地球軌道（LEO：Low Earth Orbit）における ISS「きぼう」の船内および船外の実測評価から、シミュレーション結果とのベンチマークスタディを行い、適切な遮蔽材料や厚さを算出した。実測とシミュレーション結果がよく一致することから、図 1 の構造体を用い、地磁気圏外（BLEO：Beyond LEO、深宇宙環境）および月面での船内でのシミュレーション評価および、BLEO での適切な遮蔽材料および遮蔽厚さの評価を行った。

表-1 の結果から、「きぼう」全体の平均遮蔽評価用の球体宇宙船を、LEO、月面、地磁気圏外（深宇宙環境）に設置すると、  
 -深宇宙での被ばく線量は、LEO の 3 倍  
 -月面環境（月自体が遮蔽対となるため、月の裏側からの放射線の流入はない）は 2.4 倍  
 最も遮蔽効果のあったポリエチレン 15 g/cm<sup>2</sup> を付加すると、これらの線量を  
 -LEO では 30%低減できる  
 -BLEO では、22%低減できる  
 ことが可能であることが分かった。

月面の被ばく線量は、これまでのほとんど計測されたとがない。月表面の計算結果および遮蔽材料の線量低減効果については、実測データを取得し、表-1 の評価を、有人探査に向けた宇宙船の遮蔽設計にフィードバックする必要がある。JAXA は、2017 年 12 月にインドのサティッシュ・ダワン宇宙センターから打ち上げられる月面ローバー SORATO に、被ばく線量計 D-Space を搭載し、月面放射線環境の実測を行う予定である。今後表-1 を利用することで、月面での遮蔽材料と遮蔽効果のシミュレーションへのフィードバックや再評価を行える。

表-1 LEO、月面、BLEO に「きぼう」全体の平均遮蔽評価用の球体宇宙船（図 1 左）を設置した際の、船内の PADLES 線量計および水球ファントムに対する被ばく線量評価（D:吸収線量、H:線量当量、ED:実効線量）  
 \*シミュレーション条件（それぞれ SEP は考慮しない。）

LEO : S<sub>min</sub> with at an altitude of 350km

Moon (Lunar Surface): S<sub>min</sub>

BLEO : S<sub>min</sub>

Location	Tally	D [mGy/day]	H [mSv/day]	ED [mSv/day]
LEO	PADLES (CR-39: 15 x 15 x 0.4 cm)	2.58E-01	6.63E-01	3.66E-01
	Water Spherical Phantom (φ30cm)	1.50E-01	3.31E-01	
Lunar Surface	PADLES (CR-39: 15 x 15 x 0.4 cm)	5.31E-01	1.81E+00	8.27E-01
	Water Spherical Phantom (φ30cm)	Under Cal.	Under Cal.	
BLEO	PADLES (CR-39: 15 x 15 x 0.4 cm)	7.04E-01	2.39E+00	1.082E+00
	Water Spherical Phantom (φ30cm)	5.34E-01	1.37E+00	

#### 5. まとめ、考察

宇宙飛行士の軌道上での滞在期間は、被ばく線量によってのみ制限される。そのため、宇宙飛行士の長期滞在化を図るためには、宇宙放射線による被ばく線量の低減が最も重要な課題となる。

遮蔽材料（受動的なパッシブシールド）は、遮蔽防護の戦略のひとつではあるが、船壁に追加するだけでは 30%程度の低減しか見込めない。現在のパッシブシールド技術でも、27 歳以上（全ての年齢）の男性、31 歳以上の女性は、ISS 生涯実効線量制限値を超えることなく有人火星ミッションへの参加が可能である。さらなる長期宇宙滞在のためには、下記の通り、宇宙線船内への遮蔽材料の配置の工夫や宇宙船設計デザインの工夫と組み合わせ、より効果的な遮蔽が可能である（図 7）。

- ・往還機の構造物を考慮した遮蔽設計を行う。
- ・往還機の太陽側により厚い遮蔽材料を配置する。
- ・宇宙飛行士の着衣にライフジャケット様の遮蔽材料をもたせ、太陽フレア時に宇宙飛行士が直接着せる。
- ・アクティブシールド（電磁コイルによるソレノイド構造による遮蔽）との組み合わせによる相乗効果を持たせる。

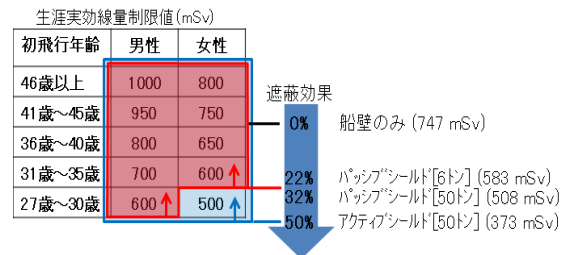


図 7 「きぼう」全体の平均遮蔽評価用の球体宇宙船（図 1 左）で火星往復 940 日（往復 440 日、火星滞在 500 日として計算）の被ばく線量およびパッシブシールドおよびアクティブシールドの線量低減効果のシミュレーション計算

また、遮蔽効果の正確な評価や宇宙飛行士の被ばく管理のためには、①-③の精度向上および手法の確立を同時に実施していくことが必須である。

- ①宇宙飛行士の被ばく量の正確な計測・予測
- ②宇宙放射線の効果的な遮蔽防護技術構築
- ③生涯実効制限値の緩和（生体影響のリスク評価の見直し）

#### 引用文献：

[1] A. Nagamatsu et.al., Area Radiation Monitoring on ISS Increments 17 to 22 Using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo, Radiation Measurements 59, 84-93 (2013)

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件) 他作成・投稿中4件

[1] A Nagamatsu, K Shimada, K Nishi, C Matsumura, J Shimada, D Masuda, N Yasuda, K Takeda, T Sato: Shielding evaluation of the ISS 'KIBO' hull walls for space radiation between radiation dosimetry inside/outside and PHITS simulation Radiation Measurements in printing 査読有 (2017)

[2] T Sato, A Nagamatsu, H Ueno, R Kataoka, S Miyake, K Takeda, K Niita: Comparison of Cosmic-Ray Environments on Earth, Moon, Mars, and in Spacecraft using PHITS, Neutron and ion Dosimetry Symposium (NEUDOS13) in printing 査読有 (2017)

[3] T Sato, S Abe, A Nagamatsu: Space and Terrestrial Cosmic-Ray Environments Estimated using PHITS and EXPACS, The 11th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Applications (11th RASEDA) in printing 査読有 (2017)

[4] A Goto, K Shimazaki, Y Kimoto, H Matsumoto, A Nagamatsu, PHITS: Simulations for Development of Space Radiation Shielding Materials, the 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) 査読有 (2017)

[5] A Nagamatsu, M Casolino, O Larsson, T Ito, N Yasuda, K Kitajo, K Shimada, K Takeda, S Tsuda, T Sato: Space radiation dosimetry to evaluate the effect of polyethylene shielding in the Russian segment of the International Space Station. Physics Procedia 80, 25-35 査読有 (2015)

[6] O Larsson, V. V. Benghin, T Berger, M Casolino, IV Chernikch, L Di Fino, C Fuglesang, M Larosa, B Lund-Jensen, A Nagamatsu, L Narici, IV Nikolaev, VM Petrov, P Picozza, G Reitz, C De Santis and V Zaconté, Measurements of heavy-ion anisotropy and dose rates in the Russian section of the International Space Station with the Sileye-3/Alteino detector, J. Phys. G : Nucl. Part. Phys. 42, 025002 査読有 (2015)

〔学会発表〕(計26件) うち国際会議15件、

うち招待講演3件

[1] A Nagamatsu, T Ito, T Sato, N Yasuda, K Kitajo, K Shimada, S Sakane, K Takeda, K Niida: Variation of long term space radiation monitoring and the PHITS simulation during the solar minimum to maximum of the 24th solar cycle inside/outside of the ISS 'KIBO', 20th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station (WRMISS)、ケルン (2015.09.10)

[3] A Nagamatsu, H Tawara, T Ito, Keiichi K, K Shimada, I Nikolaev, R Tolochev, V Shurshakov : Comparison between Measured and Simulated Radiation Doses in the Matoroshka-R Spherical phantom Experiment#1 and Area Monitoring aboard International Space Station using PADLES from May - Sep. 2012 (COSPAR), モスクワ (2015.08)

[2] A Nagamatsu: Space Radiation Dosimetry in the ISS, spearheading the following steps on the pathway to human space exploration beyond low-Earth orbit, International Congress of Radiation Research (ICRR2015)、招待講演、京都 (2015.05.28)

〔図書〕(計2件)

[1] 永松愛子、国際宇宙ステーション「きぼう」における宇宙放射線の被ばく線量計測と次世代有人宇宙開発への応用について、RIST ニュース No. 53、24-33 (2012)

<http://www.rist.or.jp/rnews/53/53s4.pdf>

〔その他〕ホームページ等(計2件)

[1] 「ISS 宇宙放射線環境計測データベース」  
<http://iss.jaxa.jp/spacerad/index.html>

[2] 放射線と地球の旅  
[https://www.jaea.go.jp/the\\_radiation\\_odysey/](https://www.jaea.go.jp/the_radiation_odysey/)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

永松 愛子 (NAGAMATSU, Aiko)

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構  
有人宇宙技術部門 有人宇宙技術センター・  
主幹研究開発員 (研究者番号: 00421868)

(2) 研究分担者

俵 裕子 (TAWARA, Hiroko)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器  
研究機構 放射線科学センター・協力研究員

(研究者番号: 30188453)

\*平成28年4月21日退職により削除

(3) 研究協力者

・佐藤 達彦 (SATO, Tatsuhiko)

日本原子力研究開発機構 放射線防護グループ・主幹研究員

・安田 伸宏 (YASUDA, Nakahiro)

福井大学 附属国際原子力工学研究所・教授

・小平 聡 (KODAIRA, Satoshi)

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合  
研究所、主任研究員