

# PHITS を用いた月面における放射線被曝線量の計算

Calculation of Radiation Exposure on the Moon Surface by Using PHITS

環境計測グループ

Space Environment Measurement Group

込山 立人、松本 晴久

Tatsuto Komiyama and Haruhisa Matsumoto

## Abstract

JAXA published the “JAXA Vision -JAXA2025-” in March, 2005, in which JAXA proposed to prepare for the establishment of a human lunar base. To follow the vision, JAXA started several studies. Recently, in order to contribute the studies, we calculated radiation exposure dose on the moon surface by using a radiation transportation code, PHITS, developed by Koji Niita (Research organization for Information Science and Technology) et.al.

As a result of the calculation, the effective dose equivalent under 10g/cm<sup>2</sup> shielding in the solar minimum condition is around 0.55mSv/day and one in the solar flare worst day condition is around 70mSv/day. On the other hand, the effective dose without shielding in the solar minimum condition is around 0.71mSv/day and one in the solar flare worst day condition is around 4,000mSv/day. This suggests that the shielding design and the radiation exposure management will be very important for the lunar base design.

## 1. はじめに

JAXA は 2005 年 3 月に公表した「JAXA 長期ビジョン」において、有人月面拠点への準備を行うとし、現在、そのための検討が開始されている。本研究は、当該検討に対し月面における放射線環境という前提条件を与えるとともに、月面における有人宇宙活動の際に必要な放射線線量計測等の被曝管理方法を検討するための基礎データを提供するために実施した。

本研究においては、高度情報科学技術研究機構 (RIST)、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) などで開発を進めている粒子・重イオン輸送計算コード PHITS<sup>1)</sup> (Particle and Heavy Ion Transport code System) を用いて放射線計算シミュレーションを行った。PHITSは、陽子や中性子等の粒子から重イオンまで 3 次元的にモンテカルロシミュレーションによって放射線輸送計算が可能で、特に宇宙放射線防護・被曝管理の観点からは、NASAの重イオン輸送モデル (HZETRN) が 1 次元しか扱えないのに比べて、大きなメリットがあると考えられている。

## 2. 研究の概要

本研究においては、これまで次の項目について計算を行った。

- (1) 月面における二次中性子及び二次光子スペクトルの計算

月面の放射線環境の主要な成分は銀河宇宙線であるが、月面の放射線環境をより詳細に把握するため、銀河宇宙線と月面との衝突によって生じる二次中性子及び二次光子のスペクトルの計算を行った。計算は、太陽活動極小期（CREME86で計算）の場合及び太陽粒子現象（SPE、CREME96におけるWORST DAY（1989年10月20日のSPEの最大フラックス）<sup>2)</sup>）の場合のそれぞれについて行った。

#### （2） 遮蔽（10g/cm<sup>2</sup>）下における粒子スペクトルの計算

一定の遮蔽下における被曝線量を計算するための基礎データとして、銀河宇宙線、SPE粒子並びに月面との相互作用で生じた二次中性子及び二次光子が、アルミ 10g/cm<sup>2</sup>厚の遮蔽を通過した後のスペクトルを（1）の計算結果を用いて計算した。

#### （3） 月面における被曝線量

（1）及び（2）で計算されたスペクトルを用いて、それぞれの場合について実効線量当量（国際放射線防護委員会が1990年勧告で示した線質係数及び組織荷重係数を用いて計算される線量。宇宙飛行士の被曝線量を管理するための防護量として用いられている。）及び当該線量に対する各粒子の寄与割合を計算した。なお、本計算には、PHITSにて計算されたフルエンス-被曝線量換算係数<sup>3) 4)</sup>を用いた。

### 3. 成果の概要

#### （1） 月面における二次中性子及び二次光子スペクトルの計算

太陽活動極小期における月面の二次中性子及び二次光子スペクトルの計算結果を一次粒子（銀河宇宙線）のスペクトルとともに Figure 1 に示す。

SPEのWORST DAY時の月面の二次中性子及び二次光子のスペクトルの計算結果を一次粒子（SPE粒子）のスペクトルとともに Figure 2 に示す。なお、本スペクトルはすべてSPE粒子によって発生したもののみを示した。

#### （2） 遮蔽（10g/cm<sup>2</sup>）下における粒子スペクトルの計算

（1）の太陽活動極小期のスペクトルをもつ粒子がアルミ 10g/cm<sup>2</sup>を通過した後のスペクトルをFigure 3に示す。

（1）SPEのWORST DAY時のスペクトルをもつ粒子がアルミ 10g/cm<sup>2</sup>を通過した後のスペクトルをFigure 3に示す。

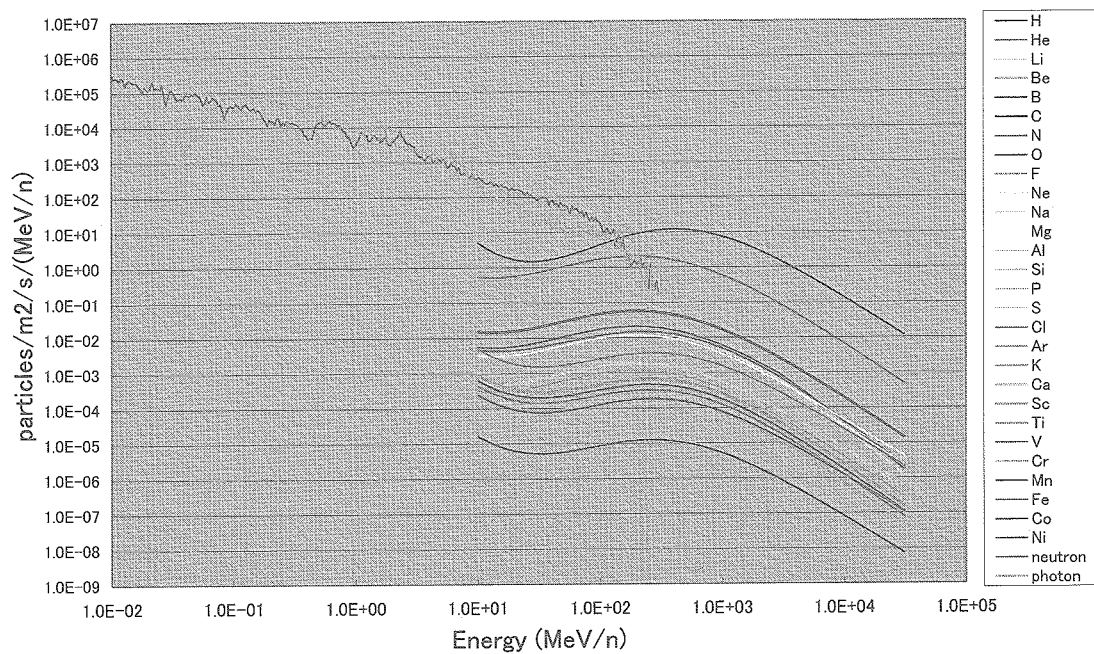


Figure 1 Differential Energy Spectra on the Moon Surface (Solar MIN@CREME86)

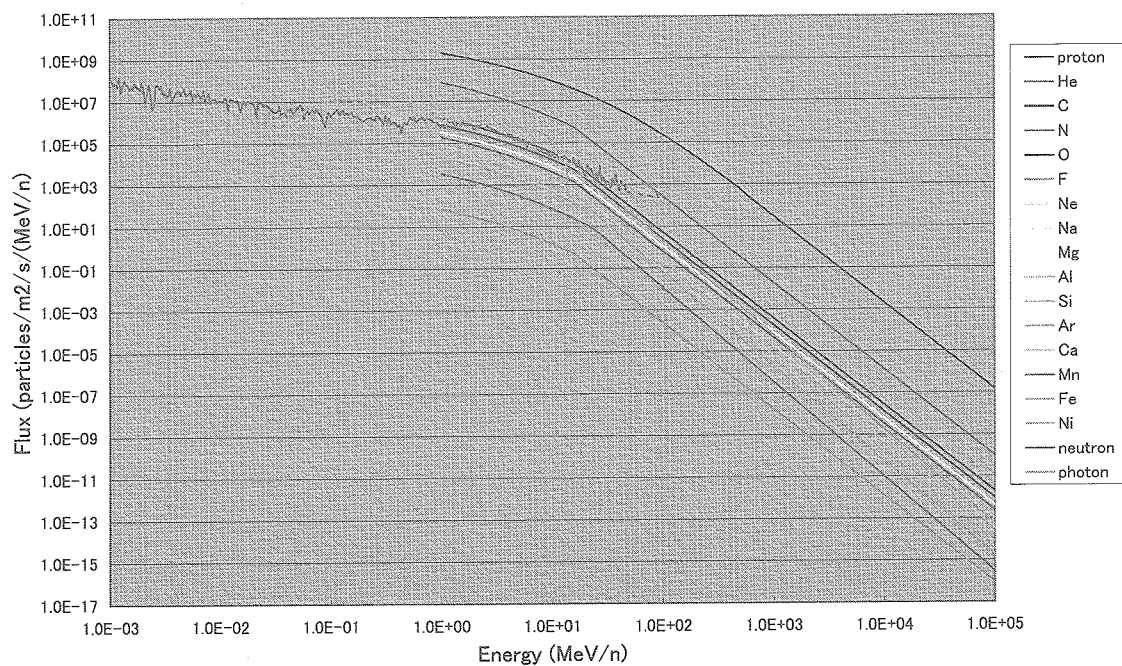


Figure 2 Differential Energy Spectra on the Moon Surface  
(SPE WORST DAY@CREME96, only SPE particles are shown.)

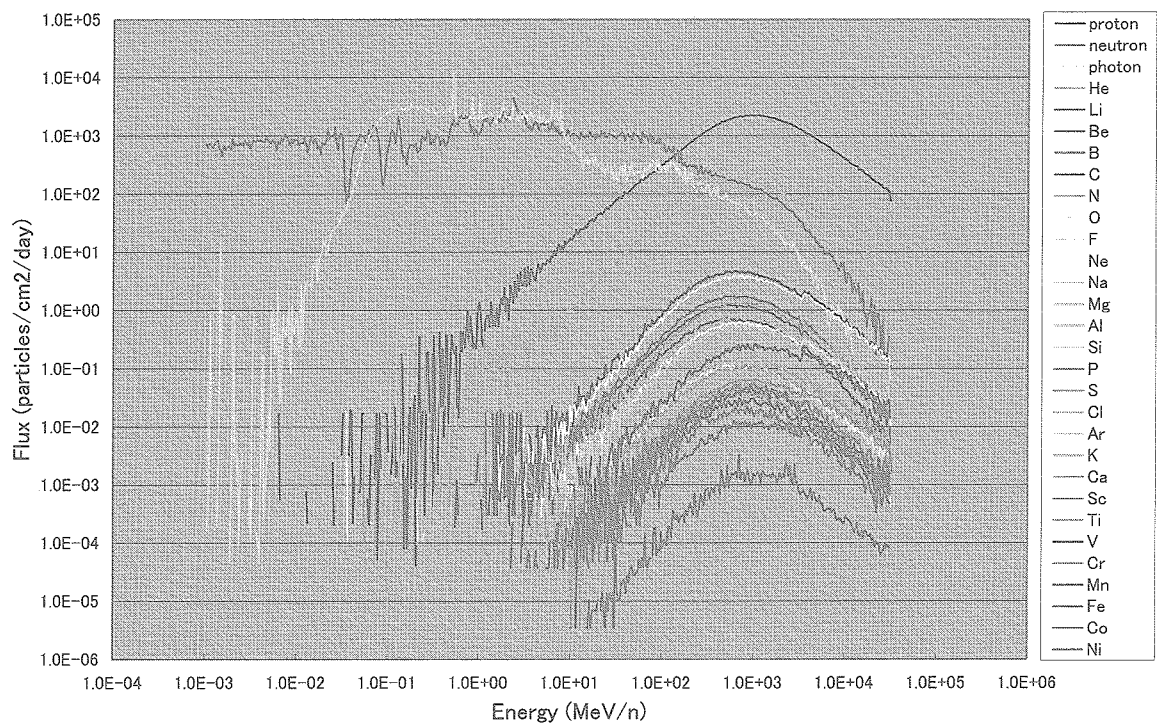


Figure 3 Differential Energy Spectra under 10g/cm² Aluminum Shielding on the Moon Surface (Solar MIN@CREME86)

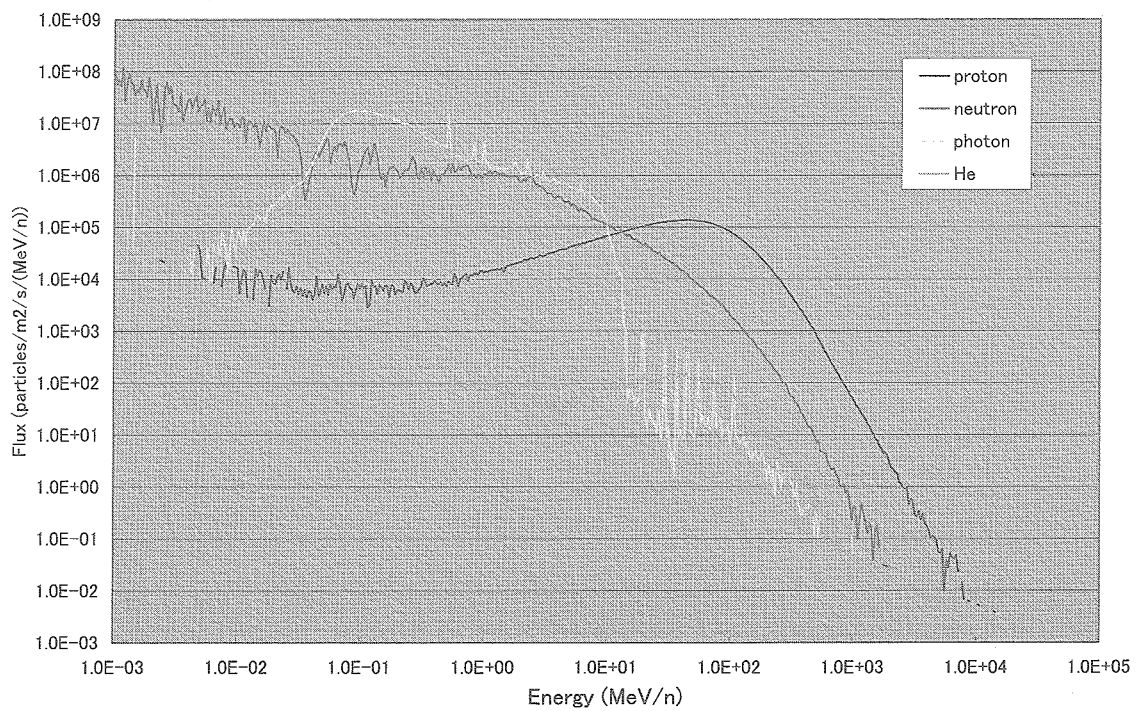


Figure 4 Differential Energy Spectra under 10g/cm² Aluminum Shielding on the Moon Surface (SPE WORST DAY@CREME96, only SPE particles are shown.)

(3) 月面における被曝線量

月面における被曝線量の計算結果を Table 1 に示す。なお、SPE は通常数日間続く現象であるが、平常時との比較のため、1 日あたりの線量を示した。

これらの値は、参考文献 5) に示されている銀河宇宙線及び SPE 粒子の線量と比較し、妥当な値を示している。

Table 1 Calculation Results of Radiation Exposure Dose on the Moon Surface

	Solar Activity	Shielding	Effective Dose Equivalent (mSv/day)
a	MIN	none	0.71
b	MIN	Aluminum 10g/cm <sup>2</sup>	0.55
c	SPE (WORST DAY)	none	4100
d	SPE (WORST DAY)	Aluminum 10g/cm <sup>2</sup>	36

また、被曝線量に対する各粒子の寄与割合をアルミ 10g/cm<sup>2</sup>遮蔽の場合についてFigure5 及びFigure6 にそれぞれ示す。

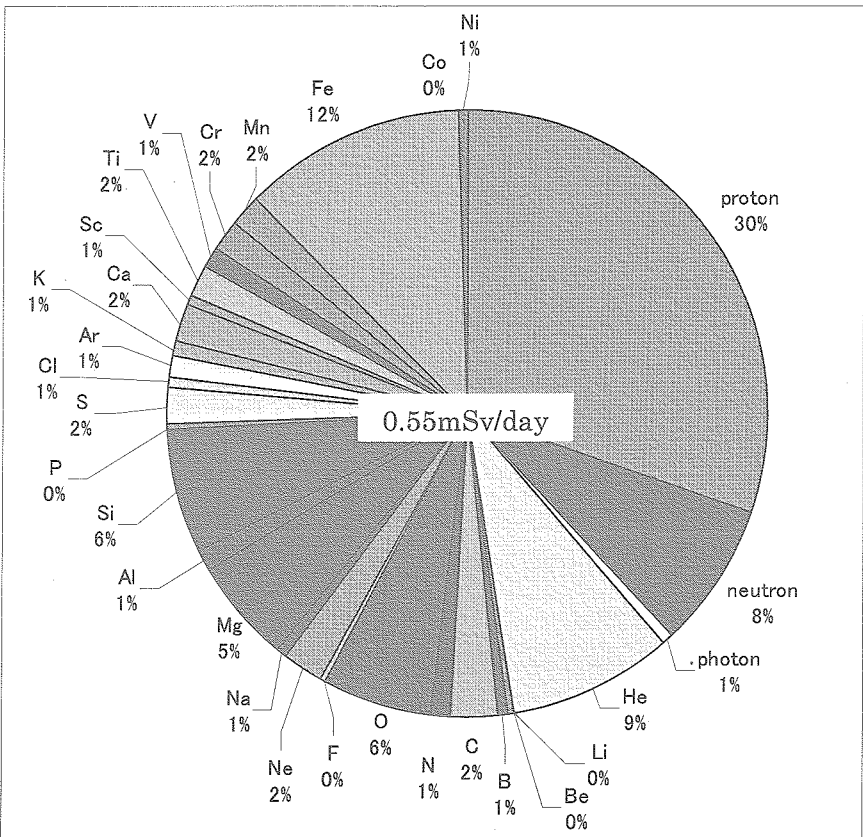


Figure 5 Contributions to the Total Dose on the Moon Surface (Solar MIN@CREME86, under 10g/cm<sup>2</sup> Aluminum Shielding)

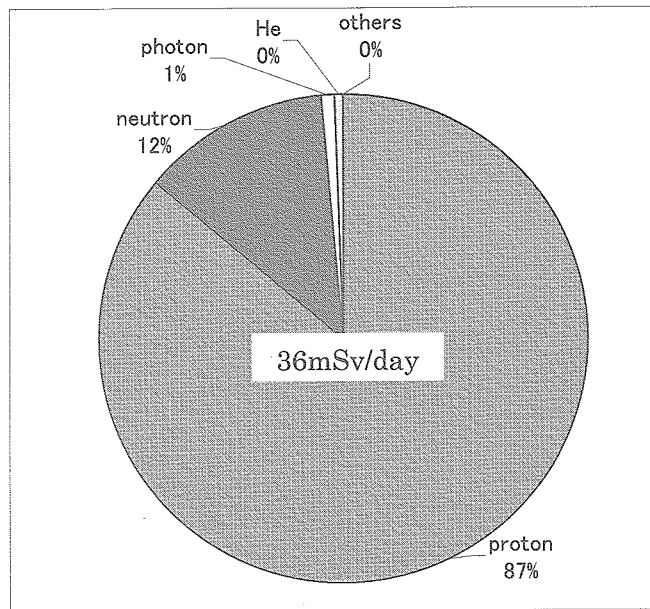


Figure 6 Contributions to the Total Dose on the Moon Surface  
(SPE WORST DAY@CREME96, Only SPE particles、under 10g/cm<sup>2</sup> Aluminum Shielding)

#### 4. まとめ

月面における被曝線量（太陽活動極小期及びSPE時）を遮蔽なしの場合及びアルミ 10g/cm<sup>2</sup>遮蔽の場合について計算した。月面の平常時（SPEがない場合）における線量は、国際宇宙ステーションに搭乗する宇宙飛行士の線量と同程度であることが分かった。一方、SPE時は、遮蔽により線量を大きく減らすことができることが示唆された。

このことから、月面拠点の設計にあたっては、特に、遮蔽設計が重要であること、及び月面における船外活動の際に宇宙天気を観測／予報する技術が重要であると考えられる。

今後、様々な遮蔽厚の場合の線量計算及び遮蔽材を変化させた場合の線量計算を行い、月面拠点の概念検討に役立つデータを提供していきたい。

#### 【参考文献】

- 1) “Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code” H. Iwase et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* 39, 1142 (2002)
- 2) <https://creme96.nrl.navy.mil/>
- 3) “Conversion Coefficients from Fluence to Effective Dose for Heavy Ions with Energies up to 3 GeV/A” T. Sato, et al., *Radiat. Prot. Dosim.* 106(2), 137-144 (2003)
- 4) “Profile of Energy Deposition in Human Body Irradiated by Heavy Ions” T. Sato et al., *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.* 4 287-290 (2004).
- 5) “Managing Lunar and Mars Mission Radiation Risks, Part I: Cancer Risks, Uncertainties, and Shielding Effectiveness” Francis A. Cucinotta et.al., NASA/TP-20050213164 (July 2005)