

# 宇宙放射線被曝線量計測の現状とその展望

慶大医/JAXA 寺沢和洋

KEK 佐々木慎一、岸本祐二、高橋一智

JAXA 永松愛子

神戸大 身内賢太郎

## Present status of space dosimetry and its prospect

*Kazuhiro Terasawa<sup>1,2</sup>, Yuji Kishimoto<sup>3</sup>, Kentaro Miuchi<sup>4</sup>, Aiko Nagamatsu<sup>2</sup>, Shin-ichi Sasaki<sup>3</sup>, and Kazutoshi Takahashi<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> School of Medicine, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kouhoku-ku, Yokohama, Kanagawa, 223-8521  
E-mail: terasawa@z6.keio.jp

<sup>2</sup> Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sengen 2-1-1, Tukuba, Ibaraki, 305-8505

<sup>3</sup> Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>4</sup> Graduate School of Science, Kobe University, Rokko-dai 1-1, Nada-ku Kobe Hyogo, 657-8501

**Abstract:** The present status for space dosimetry was described. Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) has worked as a space dosimeter for 1.4 years inside the Japan Experimental Module (JEM) of the International Space Station (ISS) since December, 2016. And the compact-size dosimeter "D-Space" has been developed for the missions with restricted resources such as small satellites.

**Key words;** Space Dosimetry, Dose Equivalent, LET, PS-TEPC,  $\mu$ -PIC, TEPC, RRMD-III, HIMAC

## 1. はじめに

NASA、JAXAによると、地球周回低軌道上の国際宇宙ステーション (ISS) の運用は 2024 年に一端節目を迎え、それ以降は民間中心となり、2022 年以降、月周回軌道上の新宇宙ステーション「Gateway」の建設を開始、2026 年の完成を目指す計画が発表されている。

このことは宇宙放射線による被曝がより深刻化することを意味する。すなわち、地磁気圏内から圏外に活動の場が移行することで、銀河宇宙線のフラックスが増加、エネルギースペクトルのピークが低エネルギー側にシフトし、線量率が増加することで、太陽活動極小期においては、銀河宇宙線からの寄与が 1 mSv/d を超えることも想定される。同様に、地磁気圏外での被曝となる火星への有人飛行となれば約 3 年の宇宙滞在となり、現状で宇宙飛行士に課せられている生涯被曝線量限度 (~1000 mSv) <sup>1)</sup> の変更も余儀なくされると考えられる。

従って、これまで以上に実測の重要度は増し、かつてのスペース・シャトル内での実測データで生じた大きな食い違い (RRMD-III: Real-time Radiation Monitoring Device-III と TEPC: Tissue

Equivalent Proportional Counter) <sup>2)</sup> は許されず、各国・各宇宙機関等が独立に継続して実測し、クロスチェックを行うことが肝要である。

定常的な被曝の大半は一次荷電粒子線からもたらされるが、それらが宇宙船の線壁や搭載物と相互作用し生成される二次中性子も被曝に寄与する。STS-89 での RRMD-III と BBND (Bonner Ball Neutron Detector) <sup>3)</sup> の実測によれば、荷電粒子 80%、中性子 20%であるが <sup>4)</sup>、中性子の寄与は周辺の物質に大きく依存し、また中性子の実測エラーは荷電粒子に対してより相対的に大きく、注意が必要である。

Fig.1 に生涯被曝線量限度を 1200 mSv とした場合の実質的な宇宙滞在期間 (縦軸) を示す。横軸は荷電粒子についての測定エラーを示し、各曲線は荷電粒子と中性子の寄与の割合を示している。荷電粒子の線量寄与が 100 %の場合に、測定エラーが 0 %で、線量率を 1 mSv/d とすれば、宇宙滞在期間は単純に 3.3 年となる。

例えば、中性子に対する実測エラーを 100 %とし、荷電粒子についてのエラーを 10 %とした場合と 30 %とでは、中性子の寄与を全体の 20 %と想定すると、実質的な宇宙滞在期間は 1 割ほどしか違わ

なくなる (2 年強)。よって、中性子の寄与が宇宙滞在期間に大きく影響し、荷電粒子と共に中性子の

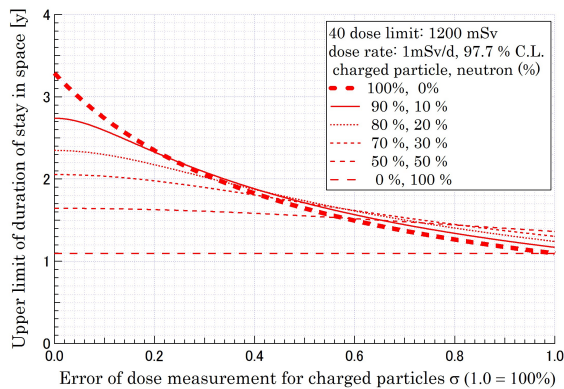


Fig.1 Upper limit of duration of stay in space given as a function of error of dose measurement for charged particles (see text).

実測も肝要であることがわかる。

## 2. 宇宙放射線線量の評価法の現状

線量の実測は線量当量  $H$  で評価され、吸収線量  $D$  と線質係数  $Q$  の積として表される。 $Q$  は LET の関数として与えられるため、LET の実測が線量計測の本質である。

実効線量  $E$  についての実測は困難で、各粒子のエネルギースペクトルの実測を massive な検出器を用いて月面上等で行える可能性があるが、サイズや重量などが限定される衛星や宇宙船内における実測では、エネルギー範囲が限定され、非現実的である。RRMD-III 以前の RRMD-I や-II での実測が元々エネルギースペクトルの一部取得から始まった一方で、そのスペックの範囲において LET 分布を取得し、RRMD-III になって LET 分布 (全体の) 取得に特化したのはそのためである。(宇宙放射線線量の実測法、評価法についてはこちらのまとめ<sup>5)</sup>を参照)。

ここで、物理量として直接実測できるのは、LET と吸収線量のみで (LET を実測すれば吸収線量は自ずと求まるが逆は不成立)、単位 Sv を使用する際には生物学的効果 (RBE, Relative Biological Effectiveness) の指標となる線質係数等が必須である。

これまでに、ICRP-26 や-60 で定義された式や放射線加重係数が存在するが、それらの食い違いが報告されており<sup>6,7)</sup>、このことから線質係数の評価は今後も過渡期にあると考えられ、定義が変更されたとしても対応できるように、LET の実測をしておくことが肝要である。無論、LET 以外を変数

として REB を評価できる可能性を否定するものではないが、現状の放射線加重係数はエネルギーの粗い関数として与えられているのみで、宇宙放射線線量の評価には適さない。

## 3. 能動型宇宙放射線線量計の開発状況と今後

### 3-1. 位置有感生体組織等価比例計数箱 PS-TEPC

荷電粒子のみについての実測エラーについては、RRMD-III には放射線の入射位置情報から LET の直接的な実測が可能のため、TEPC より圧倒的に優れているものの (TEPC は 60 %以上、RRMD-III は 10 %未満<sup>2)</sup>、RRMD-III については Si 検出器を使用しており、生体組織等価物質で構成される TEPC に比べて中性子に対する感度は格段に落ちる。そこで、RRMD-III の位置有感性と TEPC の生体組織等価性の両方を兼ね備えた検出器としてのコンセプトの元、PS-TEPC (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber) を開発し、2016 年 12 月から 2018 年 4 月まで ISS 上の Japan Experimental Module (JEM) の与圧部内で、実測を果たした<sup>8)</sup>。

位置有感性を担保するために  $\mu$ -PIC (Micro Pixel Chamber) という電極基板を使用し<sup>9)</sup>、位置検出を行い 3 次元飛跡検出器として飛跡並びに付与エネルギーを得ることで LET 情報を取得している。今後、火星等への長期ミッションでの搭載を目指すべく、検出器の一層の長期安定化への工夫として、ガス種の変更や電極への印加電圧をより低く抑えられる  $\mu$ -PIC の開発を検討している。

### 3-2. 超小型アクティブ線量計 D-Space

前述のエリアモニターを開発する一方、リソースが限定される衛星や探査機等への搭載性を追求し、小型化・省電力化に重点を置いた超小型能動型線量計の開発を継続している。

具体的には福島用に開発された D-shuttle (重量は 23g で、ボタン電池 1 つで 1 年動作) がその候補であり<sup>10)</sup>、宇宙機用に転用することを検討している。

地上でのガンマ線を用いた照射においては、0.05~50 mSv/d 以上の広範囲において応答のリニアリティが確認されているが、proton 230 MeV に対しても、0.5~50 mSv/d の範囲で応答評価を行い、同様の応答が確認された。今後も照射試験を継続し、小型探査機等への搭載を目指す一方、個人線量計や複数の組み合わせによる使用も検討する。

## 謝辞

PS-TEPC は、以下の各機関・施設におけます研究課題として採択され研究が実施されていますのでここに感謝申し上げます。

- ・ 宇宙航空研究開発機構、(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行っておりました実験研究の継続版
- ・ 放射線医学総合研究所・ HIMAC 施設共同利用研究課題、サイクロトロン施設研究課題 (PS-TEPC、D-Space 共に)
- ・ 高エネルギー加速器研究機構・共同開発研究課題
- ・ 宇宙航空研究開発機構・宇宙環境利用科学委員会・研究/調査グループで行って行っておりました研究の継続版

## 参考文献

- 1) 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定、ISS 搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値 (2013).
- 2) Terasawa, K. et al.; Real-time measurement of LET distribution for space dosimetry by RRMD, *Ioniz. Radiat.*, 28-2, 169 (2002).
- 3) Matsumoto, H. et al.; Real-time measurement of low-energy-range neutron spectra on board the space shuttle STS-89 (S/MM-8), *Radiat. Meas.*, 33, 321 (2001).
- 4) Terasawa, K. et al.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) and establishment of dosimetric technique in the International Space Station (ISS) with PS-TEPC, *SUR*, 24, 322 (2008).
- 5) Terasawa, K.; Problem of neutron dosimetry in space, *Spa. Radiat.*, 3-3, 157 (2002).
- 6) Yoshizawa, N. et al.; External radiation conversion coefficient using radiation weighting factor and quality factor for neutron and proton from 20 MeV to 10 GeV, *J. Nucl. Sci. Tech.* 35-12, 928 (1998).
- 7) Borak, T.; Quality factors for alpha particles emitted in tissue, *Health Phys.*, 82-1, 102 (2002).
- 8) Terasawa, K. et al.; Present status of development for the domestic space dosimeters, *SUR*, 33, 1-3 (2019).
- 9) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. Meths.*, A471, 264 (2001)
- 10) [http://www.c-technol.co.jp/radiation\\_monitoring/monitoring03](http://www.c-technol.co.jp/radiation_monitoring/monitoring03) (2020.Jan.).