

国産能動型宇宙放射線線量計の開発状況(2018)

慶大医/JAXA 寺沢和洋

KEK 佐々木慎一、岸本祐二、高橋一智、齋藤究、俵裕子

JAXA 梶田大輔、池田直美、永松愛子、勝田真登、松本晴久、込山立人、布施哲人

神戸大 身内賢太郎

京大 谷森達、窪秀利

放医研 北村尚、小平聡

Present status of development for the domestic space dosimeters

Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Tetsuhito Fuse², Naomi Ikeda², Masato Katsuta², Yuji Kishimoto³, Hisashi Kitamura⁶, Satoshi Kodaira⁶, Tatsuto Komiyama², Hidetoshi Kubo⁵, Daisuke Masuda², Haruhisa Matsumoto², Kentaro Miuchi⁴, Aiko Nagamatsu², Kiwamu Saito³, Shin-ichi Sasaki³, Kazutoshi Takahashi³, Toru Tanimori⁵ and Hiroko Tawara³

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

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

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

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

⁵ Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

⁶ National Institute for Radiological Sciences (NIRS), Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

Abstract: Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) has worked as a space dosimeter inside the Japan Experimental Module (JEM) of the International Space Station (ISS) since December, 2016. The detector has position sensitivity and tissue equivalency. The PS-TEPC is a kind of a time projection chamber and three dimensional tracks can be obtained to measure the LET of each incident particle.

Key words; Space Dosimetry, Dose Equivalent, LET, PS-TEPC, μ -PIC, TEPC, RRMD-III, HIMAC

1. はじめに

宇宙放射線線量の評価は、直接実測できる物理量を元に、LETの関数として与えられる生物学的効果を考慮した線量当量や実効線量等量（単位：Sv,シーベルト）により現状では行われている。その物理量とは粒子の(i)全エネルギー、(ii)LET、(iii)検出器で得られる信号の波高値、(iv)カウント数、等である¹⁾。何を実測しようとするかによって、検出器のサイズや電力、測定法・測定精度、線量の評価・計算プロセスが異なり、目的・用途に応じて選択する必要がある。

国際宇宙ステーション(International Space Station, ISS)上でのクルーに適用される被曝線量限度は年齢と性別に依存し、現状で数百から~1000 mSv以内に設定されているが²⁾、地磁気圏外では線量率が高くなり、火星往復の際はこの限度に迫る、或いは超える被曝を覚悟しなくてはならない。

地球と火星の公転周期(火星は687日)によって限定される火星への有人飛行のタイミングは2年1~2か月毎に現れるが、より短期間での往復の実現を想定すると、時期がより限定されることになる。更に銀河宇宙線による定常被曝を抑えるという観点から、太陽活動極大期を選ぶと更に現実的な解が制限されることとなる。更に太陽フレア発生に伴う低エネルギーの陽子(<~200 MeV)に対する最低限の遮蔽を考慮する必要がある。

そのような状況の中、太陽活動に限らず、いくつかの線量をコントロールするための対策・要素・トレードオフがあり³⁾、その1つが測定器側からできる貢献で、現状で唯一の実測の手段を与えるにとどまらず、測定精度を向上させることで実質的な宇宙滞在期間を延ばすことが可能となる^{4,5)}。単純計算で、1 mSv/dの線量率で被曝限度が1000mSvであれば、誤差(σ)50%で2 σ 以内に抑えると滞在期間は

500 日となるが、30%なら 600 日強の滞在が可能となる。

測定器に依存した精度として 30%以内が推奨されているが⁶⁾、米 NASA が標準検出器として採用している Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) は位置情報を持たず⁷⁾、線量計測上必要な LET の実測は粗い近似になってしまい、円筒形の場合は形状に依存する系統誤差のみで 51 %、球形は 35%となり、事実上、吸収線量のみが与えられている。

一方、国産の Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III)⁸⁾ は 3 枚の位置検出器で校正され、測定精度についての基準を満たしているものの、Si 検出器であるために中性子への感度が期待できない。

そこで、両線量計のそれぞれの特徴（生体組織等価性と位置有感性）を活かした新たな線量計 (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber, PS-TEPC) の開発に着手し^{9,10)}。ISS 内への搭載を果たした。

更に、搭載性（小型化）を追求した新たな超小型の能動型線量計の開発状況についても報告する。

2. PS-TEPC とこれまでの結果について

PS-TEPC は電極や検出媒体を生体組織等価物質で構成した気体 3 次元飛跡検出器 (Time Projection Chamber、TPC) で、飛跡の再構築により検出器内での粒子の経路長とエネルギー付与を実測することで LET 値（単位長さあたりの付与エネルギー）を取得することができる⁹⁾。

銀河宇宙線において主たる被曝をもたらす数百 MeV/n 近辺の粒子を加速器から照射 (proton, He, C, Si, Ar, Fe) することにより LET を評価、データ校正を行った結果、LET が最も小さく精度の悪い proton に対しても 30%未満の分解能を達成し¹¹⁾、ISS 上での実証実験を開始した。

3. 軌道上での実測初期データ

2016 年 12 月に Japan Experimental Module (JEM) の与圧部内に設置後、2018 年 4 月までの間、約 1 年 4 ヶ月に渡って軌道上での実測実験を行った。これまで RRMD 等による 2 次元位置検出器の組み合わせによる飛跡取得はあったものの、均質型の 3 次元飛跡検出器による宇宙放射線中の重イオンの飛跡取得は初となった³⁾。

Fig.1 に JEM 内に設置した PS-TEPC の写真を示す。PS-TEPC は検出部 2 つ（黒いケース）と制御部（下の銀色の箱）で構成され、検出部上部の円筒内の電極で囲まれた領域（25 mm × 25mm ×

50mm）で LET を実測する。またこの円筒の外側には受動検出器（熱ルミネッセンス線量計と固体飛跡検出器 CR-39 の組み合わせ、Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space, PADLES)¹²⁾を貼り付け、データの比較も行っている。

Fig.2 に宇宙放射線粒子カウント数の軌道上で経度緯度依存性について示す。ブラジル上空を通過

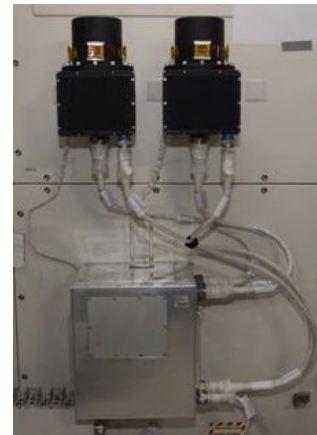


Fig.1 Photo of the PS-TEPC (flight model) inside the Japan Experimental Module of the ISS. The system consists of two detection units (black color) and a control unit (silver color, below the detection units). Passive detectors are deposited on the surface of the detector units for comparison of dose data.

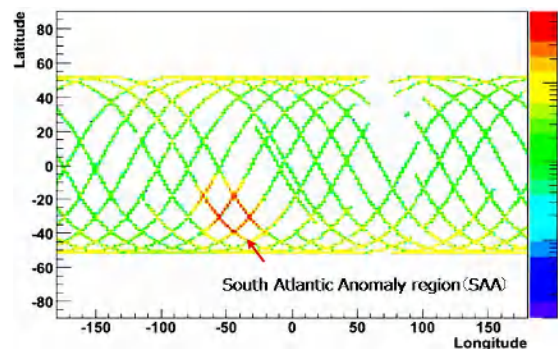


Fig.2 Geographical map of the relative counting rate for a day by the PS-TEPC



Fig.3 Photo of the D-shuttle

する際には、放射線帯の一部（南大西洋異常地域、South Atlantic Anomaly region、SAA）を5分ほど通過するため、その度にカウント数が増加する。更に極域付近を通過する際に、同様にカウント数が増加する様子をPS-TEPCにおいても確認した。

データは現在も解析が進行中で、来年度は実機を回収し検出器の劣化等を調べ、長期ミッションへ向けた改良を行っていく予定である。

4. 超小型アクティブ線量計 D-Space

RRMD-IIIやPS-TEPCなどのエリアモニターについては少なくとも、数kg、数十W程度のサイズ、電力となるが、衛星等で十分なリソースを割り与えられない場合、搭載の機会があっても見送らざるをえない。そこで、小型化・省電力化により搭載性を追及した超小型能動型線量計の開発を開始した。

具体的には福島用に開発された半導体検出器により放射線のカウントのみを計測し線量を計測する（1章の(iv)に相当する）D-shuttleが有力な候補である。重量は23gで、ボタン電池1つで1年動作させることができる。Fig.3に写真を示す¹³⁾。

地上における計測はガンマ線に主眼が置かれているが、これまでに実測対象となっていない陽子や重イオンに対する応答の実測データ取得を開始した。放射線入射で発生するパルス波高値に対するthreshold変化させた6種類の検出器において、160MeVの陽子線に対するLET値として~0.4keV μ mを得た¹⁴⁾。計算値が0.5keV μ mあり、測定精度の粗さ（前述の系統誤差については約100%となる）を考慮するとまずまずの一致といえる。今後、照射試験を継続し、小型探査機等への搭載を目指し、個人線量計としての使用も検討する。

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おりました研究の継続版

参考文献

- 1) Terasawa, K.; Problem of neutron dosimetry in space, *Spa. Radiat.*, **3-3**, 157 (2002).
- 2) 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).
- 3) Terasawa, K. et al.; Space dosimetry with a three-dimensional gas tracking detector, *SUR*, **32**, 1-3 (2018).
- 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. et al.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) for Space Dosimetry on board the International Space Station, *SUR*, **30** (2016).
- 6) *NCRP Report No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*, (2002).
- 7) Badhwar, G.D. et al.; Measurements on the shuttle of the LET spectra of galactic cosmic radiation and comparison with the radiation transport model, *Radiat. Meas.*, **139**, 344 (1994).
- 8) Doke, T et al.; Measurements of LET-distribution, dose equivalent and quality factor with the RRMD-III on the Space Shuttle Mission STS-84, -89 and-91, *Radiat. Meas.*, **33**, 373 (2001).
- 9) Terasawa, K. et al.; Position-sensitive tissue-equivalent proportional counter (PS-TEPC) for space dosimetry, *KEK Proc.* **2005-12**, 63 (2005).
- 10) Kishimoto, Y. et al.; Basic performance of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber (PS-TEPC), *Nucl. Instr. Meth.*, **A732**, 591(2013).
- 11) Terasawa, K. et al.; Development of Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) as an active dosimeter, *SUR*, **13** (2017).
- 12) Tawara, H. et al.; LET distribution from CR-39 plates on Space Shuttle missions STS-84 and STS-91 and a comparison of the results of the CR-39 plates with those of RRMD-II and RRMD-III telescopes, *Radiat. Meas.*, **35**, 119 (2002).
- 13) http://www.c-technol.co.jp/radiation_monitoring/monitoring03 (2019.Jan.).
- 14) Terasawa, K. et al.; Development of a compact-size active dosimeter in space and measurement of shielding effect, HIMAC Annual Report H27, NIRS (2016).