

能動型宇宙放射線線量計・位置有感生体組織等価物質 比例計数箱（PS-TEPC）の開発

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 永松愛子、勝田真登、榊田大輔、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

Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) as an active space dosimeter

Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Tetsuhito Fuse², Masato Katsuta², Yuji Kishimoto³, Hisashi Kitamura⁶, Tatsuto Komiyama², Hidetoshi Kubo⁵, Daisuke Masuda², Haruhisa Matsumoto², Kentaro Miuchi⁴, Aiko Nagamatsu², Kiwamu Saito³, Shin-ichi Sasaki³, Kazutoshi Takahashi³, Toru Tanimori⁵, 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: Space dosimeter named Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) has been developed. The detector has position sensitivity and tissue equivalency. The electrodes and shaping rings are made of tissue equivalent material (A-150). A flight model was irradiated with heavy ion beams at HIMAC and the energy resolution lower than 30 % was obtained for the proton beam with the energy of 230 MeV. The dosimetry onboard the International Space Station (ISS) was started in December 2016.

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

1. はじめに

宇宙飛行士の宇宙放射線による被曝線量は、宇宙での滞在期間に制限を加え、現状で数百から 1000 mSv 以内¹⁾にコントロールされているが、月や火星への長期有人飛行の際には、その数字を上回る被曝も想定されており、より多くの犠牲を容認するか、滞在期間を短くする、あるいはそれ以外の何らかの方法で線量を減らす、といった対策が必要となる。いずれにしても、被曝線量の測定精度自身が滞在期間決定に直結し^{2,3)}、NCRP 等により測定器に依存した精度として 30%以内が推奨されている⁴⁾。

月・火星長期滞在時には、火星には薄い大気(数 hPa)が存在するものの、地球上のような遮蔽効果

は期待できないので、地表に基地等を構えることは現実的ではなく、レゴリス自身等による厚い(数 m 以上)シールドにより被曝を最小限に抑えることが必須である。また、太陽フレア発生時に備え、低エネルギー陽子の被曝から逃れるために比較的薄い(~1m)シールドの一時避難基地の確保も必要となる³⁾。

線量測定の対象となる宇宙放射線の種類の内訳はスペース・シャトル STS-89 における Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III)⁵⁾と Bonner Ball Neutron Detector (BBND)⁶⁾での実測によると、陽子や重イオン等の荷電粒子が 8 割、中性子が 2 割程度であるが、中性子は 2 次中性子が主で、周辺の物質質量に依存するほか、測定精度が荷

電粒子より劣り、測定対象となるエネルギー範囲も中性子線量全体の 1/3~1/2 程度に限定されているため、全体の把握には注意が必要である。

従来の能動型線量計としては、米 NASA の Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC)⁷⁾ や国産の RRMD-III 等が存在し、軌道上での実測が行われているが、TEPC については生体組織等価物質で構成されているものの位置検出ができず、線量計測に必要な Linear Energy Transfer (LET) の測定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が 51%)、現状で吸収線量のみの実測となっている。

RRMD-III については、測定精度については基準を満たしているものの、Si 位置検出器であるため、中性子への感度が期待できない。

そこで、両線量計の特徴を生かし、生体組織等価性と位置有感性を兼ね備えた新たな線量計として、Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) の開発に着手した⁸⁾。

2. PS-TEPC について

PS-TEPC は、生体組織等価物質で構成された 3 次元位置検出器で実現可能となる。具体的には気体 Time Projection Chamber (TPC) を用いて、内部の電極やガスを生体組織等価物質(ガス)で構成し、検出器内での 3 次元的な粒子の飛跡を観測し、付与エネルギーを測定することで、線量計測に必要な LET 情報を取得することができる。測定対象となる LET 範囲は、0.2~1000 keV/μm-water である。

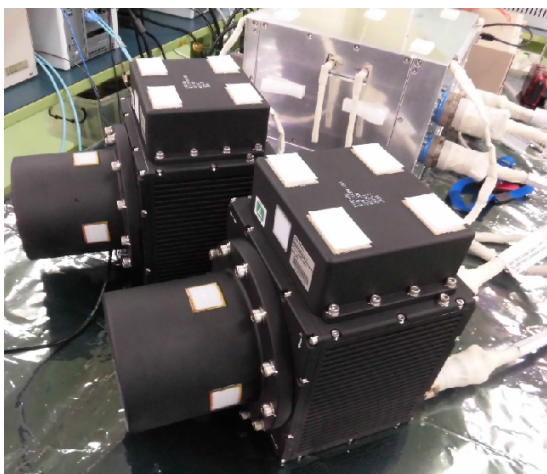


Fig.1 Photo of the PS-TEPC (flight model). The system consists of two detection units (black color) and a control unit (silver color). The cylindrical parts of the detection units are the detection volumes of the PS-TEPC.

2 次元位置検出部 (x-y 平面) には、Micro-PIXel Chamber (μ-PIC)⁹⁾ というストリップ電極の一種を使用し、電離電子のドリフト速度と検出時刻から z 軸上の位置を決定し、3 次元情報を得る。

電離電子のドリフト領域(検出部の有効体積となる)を決定するためのドリフト面、電場整形リングの各電極に導電性の生体組織等価プラスチック A-150 を使用し、検出媒体のガスとして生体組織等価ガスを封入することで、検出器全体として生体組織等価性を担保している。ガスにはプロパンベースとメタンベースの 2 種類があるが、ガスの安定性やドリフト電子の移動度を考慮し、メタンベース (CH₄: 64.4%, CO₂: 32.4%, N₂: 3.2%) を最終的に使用することに決定している。

3. これまでの結果について

まず、既存の大型タイプ(有効領域が 10 cm × 10 cm × 10 cm) の照射試験による動作実証を行い¹⁰⁾、重イオン検出に成功したことを受け、線量計測用に小型の μ-PIC を開発し、有効領域を 2.5 cm × 2.5 cm × 5 cm とした。照射実験の結果、測定精度について LET 全体に対して、σ = 30% 以下を達成できる見込みとなった¹¹⁾。

そこで、電場整形リングをワイヤータイプから導電性プラスチックに変更し、従来使用されてきたガスを Ar ベースから生体組織等価ガスに変更した後も、測定精度が保持されていることを確認した¹²⁾。

続いて、検出部については Bread Board Model (BBM) を製作し、μ-PIC 基板については四角形だったものを円形に変更し、再度重イオン照射試験を

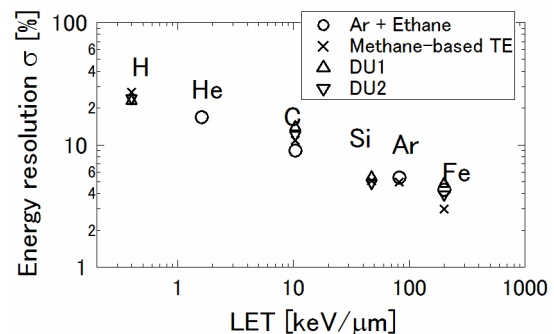


Fig.2 LET dependence of the energy resolution obtained by the flight model (DU1 and DU2). “Ar + ethane” means the results by the prototype model filled with the argon gas doped with ethane. “Methane-base TE” means the results by the model filled with methane-based tissue equivalent gas.

行った結果、これまでのプロトタイプ品と同等の測定精度を達成した¹³⁾。

最終的に、検出部と制御部の両方について、Flight Model (FM)の製作を行った (Fig.1 参照)。測定精度については、Fig.2 のような最終結果を得た。付与エネルギーに対する分解能の LET 依存性を示している。“Ar + Ethane” と “Methane-based TE” がそれぞれ、プロトタイプ検出器によるアルゴンをベースとしたガスを使用した際の結果、メタンベースの生体組織等価ガスを使用した際の結果で、Detector Unit 1 (DU1)、DU2 が FM の 2 つの検出部に照射した際の結果である。

LET が最も小さく精度が悪い proton に対しても 30%未満の分解能を達成し、各種環境試験もクリアし、軌道上での測定へ向けての準備が整った。

4. 軌道上実証へ

2016 年 12 月に HTV-6 号機により ISS へ実機を送り、12 月 15 日に JEM 与圧部内にて、各電極への電圧印加を開始した。これまで、宇宙放射線中の重イオンの飛跡取得は、2 次元位置検出器の組み合わせで主に行ってきたが、均質型の 3 次元飛跡検出器による軌道上での取得を無事行い、初期チェックアウト作業を完了している。今後、結果を順次報告していく予定である。

謝辞

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、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
- ・ 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

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.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) for Space Dosimetry on board the International Space Station, *SUR*, **30** (2016)。

- 3) 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)。
- 4) *NCRP Report No.142*, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, (2002)。
- 5) 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)。
- 6) 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)。
- 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) Terasawa, K. et al.; Position-sensitive tissue-equivalent proportional counter (PS-TEPC) for space dosimetry, *KEK Proc.* **2005-12**, 63 (2005)。
- 9) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001)。
- 10) Nagayoshi, T. et al.; Response of a micro pixel chamber to heavy ions with the energy of several hundreds of MeV/n, *Nucl. Instr. Meth.*, **A581**, 110 (2007)。
- 11) Terasawa, K. et al., Response of a prototype position-sensitive tissue equivalent proportional chamber to heavy ions with energies of several hundreds of MeV/n, *KEK Proc.*, **2011-8**, 189 (2011)。
- 12) Kishimoto, Y. et al.; Basic performance of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber (PS-TEPC), *Nucl. Instr. Meth.*, **A732**, 591(2013)。
- 13) Terasawa, K. et al.; Response of a position-sensitive tissue equivalent proportional counter to heavy ions, 2014 Annual report of the research project with heavy ions at NIRS-HIMAC (2015)。