

位置有感生体組織等価物質比例係数箱 (PS-TEPC) の開発とそれによる宇宙ステーション内での線量当量計測技術の確立 (2011年度 WG 報告)

慶大医/JAXA 寺沢和洋

早大/JAXA 道家忠義

KEK 佐々木慎一、俵裕子、齋藤究、高橋一智、岸本祐二

JAXA 松本晴久、込山立人、永松愛子、布施哲人、伊藤裕一

神戸大 身内賢太郎

京大 谷森達、窪秀利

放医研 内堀幸夫、北村尚

Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) and establishment of a technique for space dosimetry on the International Space Station (2011WG report)

Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Tadayoshi Doke^{2,3}, Tetsuhito Fuse², Yuichi Ito², Yuji Kishimoto⁴, Hisashi Kitamura⁷, Tatsuto Komiyama², Hidetoshi Kubo⁶, Haruhisa Matsumoto², Kentaro Miuchi⁵, Aiko Nagamatsu², Kiwamu Saito⁴, Shin-ichi Sasaki⁴, Kazutoshi Takahashi⁴, Toru Tanimori⁶, Hiroko Tawara⁴ and Yukio Uchihori⁷

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 Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Kikuicho 17, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044

⁴ Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

⁵ Graduate School of Science, Kobe University, Rokko-dai 1-1, Nada-ku Kobe Hyogo, 657-8501

⁶ Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

⁷ 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 been developed for space dosimetry. An experiment by proton beams with the energy of 230 MeV was performed at the HIMAC of the NIRS to understand the response of the detector. The energy resolution of $\sim 30\%$ (σ) was obtained for the energy deposited in the detector using tissue equivalent gas.

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

1. はじめに

3.11の震災以後、一般の人々においても放射線被曝を意識しなくてはならない局面に至った。一方、宇宙で活動する宇宙飛行士は、常に放射線被曝と付き合っていく必要がある。宇宙における放射線環境は地表と大きく異なり、地上ではほぼ気にする必要のない、高エネルギーの荷電粒子線（水素原子核から鉄原子核まで）とその2次粒子線（中

性子など）で、地表における放射性同位元素由来の α 、 β 、 γ 線のエネルギーがMeVのオーダーであるのに対し、被曝に寄与する宇宙放射線のエネルギー分布のピークは数百MeV/nで、宇宙船の船壁や宇宙服を突き抜け人体に進入してくる。

宇宙における宇宙放射線被曝線量は地表より2桁高く1mSv/dのオーダーであることがこれまでの実測からわかっているが¹⁾、今後、月や火星への

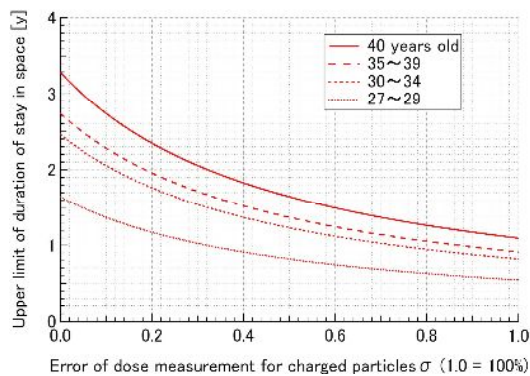


Fig.1 Upper limit of net stay period in space as a function of error for measured dose value (C.L. 97.7)

有人ミッションを想定すると、宇宙飛行士に課せられている生涯被曝線量限度に迫るような場面を考えなくてはならない。

そのような局面において、宇宙での滞在期間を決定する要因は、トータルの被曝線量であり、滞在期間は結果的に線量の測定精度に依存することになる。Fig.1 に測定精度と宇宙滞在期間の上限についての関係をグラフに示す。横軸は荷電粒子についての線量に対する測定精度、縦軸は線量率を 1 mSv/d とした場合の生涯被曝線量限度に対する宇宙滞在期間を表している。宇宙へ最初に行った年齢を 27~29 歳、30~34 歳、35~39 歳、40 歳以上とした場合の生涯被曝線量限度は男性(女性)の場合、それぞれ、600(600)、900(800)、1000(900)、1200(1100) mSv である²⁾。例えば、40 歳の男性に対して、測定精度が 0%であれば、1200/365 から 3.3 年という値が導き出されるが、測定精度が 30%であったとすると、滞在期間は 97.7%の信頼度で、2.1 年ということになる³⁾。NCRP-142 等で測定精度 30%以内が推奨されており⁴⁾、実質的な滞在期間を考慮し火星への有人ミッションを想定してもこの 30%以内が目安となる。

このように、実質的な宇宙滞在期間は測定精度に大きく依存する。実際には、中性子の線量も含めることで、滞在期間はより短くなる。線量全体に対する中性子の割合は、STS-89 での実測と推定によれば 20%で³⁾、月面上においては 8%という計算結果が出ている⁵⁾。

2. PS-TEPC とこれまでの結果について

これまで測定する側の事情から荷電粒子と中性子は別々に測定されてきた。荷電粒子に対しては、Tissue-Equivalent Proportional Counter (TEPC)⁶⁾ や Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III)¹⁾ がその代表例で、中性子については Bonner Ball Neutron Detector (BBND)⁷⁾ である。TEPC は NASA

が標準検出器として採用しており、生体組織等価物質で構成されているため中性子に感度を持つが、線量計測に必要な Linear Energy Transfer (LET) の実測に近似を利用しているため、測定精度が悪い ($\sigma \sim 60\%$)^{8,9)}。一方、RRMD-III はその位置有感性から 10%程度の測定精度で実測が可能だが、中性子への感度を期待できない。そこで、生体組織等価性と位置有感性の両方を備えた、ガス位置検出器の開発を進めている。TEPC に位置有感性を加えたという意味から Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) と名付けている。

PS-TEPC は、2 次元位置検出部に Micro-PIXel Chamber (μ -PIC)¹⁰⁾ というストリップ電極の一種を使用し、Time Projection Chamber (TPC) として動作させることで、3 次元的な飛跡と付与エネルギーについての情報を得ることで、LET を実測している。これまでに、

- ・ 有効領域が 10cm × 10cm × 10cm タイプによる照射試験
- ・ 2.5cm × 2.5cm × 5cm タイプの開発と生体組織等価物質によるドリフトケージの製作
- ・ Ar ベースガス (Ar: 90%、C₂H₆: 10%の混合ガス) 1 気圧での実験
- ・ 各重粒子に対する照射実験

を行ってきた。その結果、Ar ベースガスを使用した場合に、LET 分布全体 (0.2~1000 keV/ μ m) に対して、 $\sigma = 30\%$ 以下の精度を達成できる見込みとなった¹¹⁾。

3. 陽子照射の結果と今後について

今年度は生体組織等価ガス (C₃H₈: 55%、CO₂: 39.6%、N₂: 5.4%の混合ガス) を使用しての実験を本格化させた。その結果の一例について示す。放射線医学総合研究所の HIMAC 施設から供給される陽子線 230 MeV を照射し、3 次元飛跡と付与エネルギー分布の取得を行った。Fig.2 に 3 次元飛跡について、Fig.3 に付与エネルギー分布について示す。Anode 軸に平行になるようなビームを入射しており、飛跡を再構築できている。陽子 230 MeV に対する LET は検出器前でのエネルギー損失を考慮すると 0.42 keV/ μ m で、 $\sigma \sim 30\%$ を達成している。陽子に対する付与エネルギーは、宇宙放射線中の各粒子中で最も小さく相対的に分解能が悪く、更に高エネルギーの陽子に対してはもう少し悪い分解能も想定されるが、RRMD-III での実測によると 1 keV/mm 以下の粒子の持つ線量全体に対する寄与が 20%であることを考慮すれば、LET 範囲全体と

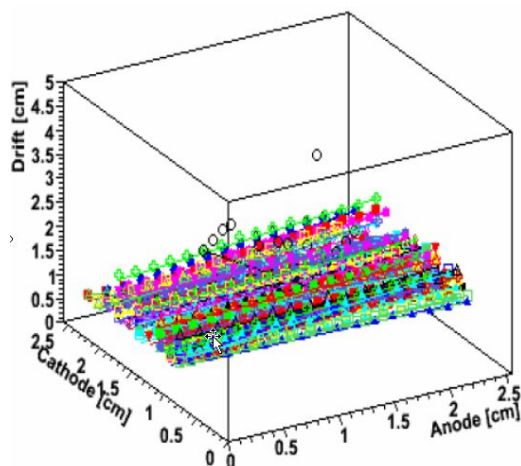


Fig.2 Distribution of energy deposited in the detector for the irradiation of protons with the energy of 230 MeV

して生体組織等価ガスを使用した場合でも、LET全体として 30%以下の分解能を達成できる見込みである。

また、 ^{252}Cf を使用した中性子検出の実験も行い、3次元飛跡の観測ならびに、エネルギー分布の測定に成功している。

今度、これらの実験結果を元に更に追加実験・解析を行いフライト品への設計・製作に役立てたいと考えている。

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, (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装置を使用したの継続研究
- ・ 放射線医学総合研究所・ HIMAC 施設共同利用研究課題
- ・ 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・研究グループ

参考文献

- 1) Doke, T. et al.; Measurements of LET-distribution, dose equivalent and quality factor with the RRMD-III on the Space Shuttle Missions STS-84, -89 and -91, *Radiat. Meas.*, **33**, 373 (2001).
- 2) 宇宙開発事業団; 有人サポート委員会宇宙放射線被曝管理分科会報告書, 平成13年.
- 3) Terasawa, K. et al.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) for Space Dosimetry, *Space Utiliz. Res.*,

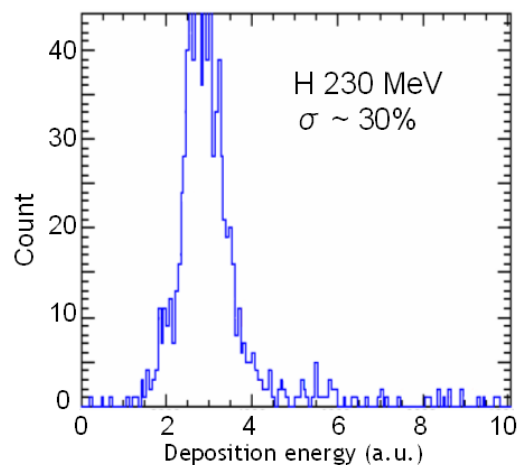


Fig.3 Distribution of energy deposited in the detector for the irradiation of protons with the energy of 230 MeV

25, 57 (2009).

- 4) *NCRP Report No.142*, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, (2002).
- 5) Komiyama, T; PHITSを用いた月面における放射線被曝線量の計算, *宇宙放射線*, **Vol.5-2**, 111 (2006).
- 6) 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. Res.* 139, 344 (1994).
- 7) 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).
- 8) Doke, T. et al.; Measurement of Linear Energy Transfer Distribution at CERN-EU High-Energy Reference Field Facility with Real-Time Radiation Monitoring Device III and Its Comparison with Dosimetric Telescope, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 3576 (2004).
- 9) NIRS; Results from the first two InterComparison of dosimetric instruments for Cosmic radiation with Heavy Ions Beams at NIRS (ICCHIBAN-1&2) Experiments, *HIMAC Technical Report 078* (2004).
- 10) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001).
- 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, *Proceedings of the 25th Workshop on Radiation detectors and Their Uses*, (2011) to be published.