

宇宙放射線線量計測のための 位置有感生体組織等価物質比例計数箱の開発の現状 (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
早稲田大学 永吉勉、藤田康信、竹内浩二、菊池順
京都大学 身内賢太郎、西村広展、窪秀利、谷森達
JAXA 松本晴久、込山立人
放医研 内堀幸夫、北村尚

Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) for space dosimetry

Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Tadayoshi Doke^{2,3}, Yasunobu Fujita³, Jun Kikuchi³, Hisashi Kitamura⁶, Tatsuto Komiyama², Hidetoshi Kubo⁴, Haruhisa Matsumoto², Kentaro Miuchi⁴, Tsutomu Nagayoshi³, Hironobu Nishimura⁴, Kiwamu Saito⁵, Shin-ichi Sasaki⁵, Koji Takeuchi³, Toru Tanimori⁴, Hiroko Tawara^{2,5} and Yukio Uchihori⁶

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

² Institute of Space Technology and Aeronautics, 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 Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

⁵ Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

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

Abstract: Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) has been developed for space dosimetry. An experiment with proton beams were performed at the cyclotron of NIRS to understand the response to protons as well as heavy ions such as He, C, Si, Ar and Fe ions. We successfully obtained the three-dimensional tracks and the charge distributions given by protons.

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

1. はじめに

スペース・シャトルや国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) 上での宇宙放射線被曝は、銀河宇宙線、捕捉粒子線、太陽フレアに伴う粒子線からもたらされる。銀河宇宙線は主に陽子とヘリウムから鉄までの重イオンで構成され、数百 MeV/n 付近にピークを持つ。捕捉粒子線とフレア粒子線は主に数百 MeV 以下の低エネルギーの陽子が被曝に寄与する。また、これらが宇宙船の船壁や搭載物と衝突し、相互作用することで、中性子を含む 2 次粒子が発生し被曝線量が更に付

加されることになる。つまり、宇宙放射線線量計測といった場合、これら荷電粒子と中性子についての測定を行う必要がある。荷電粒子についての線量の評価は、吸収線量に Linear Energy Transfer (LET) の関数として与えられる線質係数を掛けた線量当量で通常行われる。測定すべき荷電粒子の LET 範囲としては、0.2 ~ 数百 keV/ μ m-water である¹⁾。一方、中性子に対する線量評価については中性子のエネルギーを測定し、フルエンス-線量換算係数を用いて、線量を出すという方法が取られている。測定すべき中性子のエネルギー範囲は 0.1 ~

Table 1 Net lifetime effective dose considering the error of measured value and the corresponding stay period in space (C.L. 97.7%)

Male [age]	Lifetime effective dose equivalent [mSv]	Errors of measured values σ [%]			
		10	30	51	100
27~29	6.0×10^2	5.0×10^2	3.8×10^2	3.0×10^2	2.0×10^2
30~34	9.0×10^2	7.5×10^2	5.6×10^2	4.5×10^2	3.0×10^2
35~39	1.0×10^3	8.3×10^2	6.3×10^2	5.0×10^2	3.3×10^2
40	1.2×10^3	1.0×10^3	7.5×10^2	5.9×10^2	4.0×10^2
Maximum stay period in space [y] (1 mSv/y)	3.3	2.8	2.1	1.6	1.1

数百 MeV である²⁾。

我々が荷電粒子と中性子を共に実測した例は、スペース・シャトル・ミッション STS-89 での Real-time Radiation Monitoring Device (RRMD)-III³⁾ と Bonner Ball Neutron Detector (BBND)⁴⁾ によるものである。この実測によると、線量全体に対して、荷電粒子と中性子の寄与はそれぞれ、80%、20%という結果が出ている。

ここで注意が必要なのは、荷電粒子については、RRMD-III により 10%以内の測定精度を達成しているのに対し、中性子については、原理的に荷電粒子と比べ格段に測定が難しいため、factor 2 程度かそれ以上の誤差を含んでいるという点である。また、中性子の線量は周辺の物質質量にも大きく依存する。NCRP-142 において、線量計に依存する誤差で 30%以内を要求しているが⁵⁾、未だ達成されていない。

月や火星への有人宇宙飛行が本格化すると、必然的に宇宙での滞在が長期化する一方で、線量計の測定精度の悪さから必要以上に滞在期間が短くなるおそれがある。

Table 1 は、現状で宇宙飛行士に課せられている生涯実効線量当量限度を示している。2 列目の値が年齢ごとの男性に対する制限値⁶⁾となっているが、これは、あくまで線量計の測定精度が $\sigma = 0\%$ の場合で、測定精度が悪くなると 3~6 列目に示すように、実質的には更に大きな制限が加わることになる。NASA が被曝管理に使用している Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) の系統誤差 51%⁷⁾ を考慮すると許容される宇宙での滞在期間は基準の半分になってしまい、到底、長期運用に耐えうるものとはいえない。但し、ここでは信頼度を 97.7%としている。

また、最下行は、40 歳の男性の線量限度を元に、被曝線量率が 1 mSv/y とした場合の宇宙での許容滞在期間を表している。同様に測定精度が 0%であ

れば 3.3 年であるが、精度が悪いと半分以下になるおそれもある。

現状で JAXA が供給可能なのは、RRMD-III、BBND であるが、RRMD-III については約 10 年前のモデルであり、現状では小型のポータブルタイプの製作が可能である。

以上より、今後必要とされる線量計としては、RRMD-III や BBND を ISS 等でのインフラとして確立する一方、測定精度のよい中性子線量計かもしれない。荷電粒子と中性子の両用の線量計が必要となる。本研究では両用の線量計の開発を目指す。原理的には、TEPC に 3 次元位置検出の機能を付けたもので実現可能となる。そこで、Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) と呼んでいる。

2. 実験装置について

2 次元位置検出は、Micro-Pixel Chamber (μ -PIC)⁸⁾ というストリップ電極の一種を使用することで達成している。厚さ 100 μm のポリミド基板の両面に互いに垂直に 400 μm 間隔で配置した陰極・陽極ストリップからなる。陰極ストリップには 400 μm 間隔で円形の穴があり、その中心に基板を貫いて 50 μm 径の陽極ピクセルが形成されている。この陽極ピクセル付近に高電場を作ることで、各ピクセルをそれぞれ比例計数管として動作させることができる。

また、Time Projection Chamber (TPC) として機能させることで z 軸上の位置を決定し、 μ -PIC で得られる位置情報と合わせて、各粒子の 3 次元飛跡を検出し、それを基に検出器の有効領域内での経路長を測定し、付与エネルギーをその経路長で割ることで LET を決定後、最終的に線量値を得るという手法を採用している。

封入するガスは、これまでに経験のある Ar ベースのガス (Ar: 90%、 C_2H_6 : 10%の混合ガス) と線量

計測の際に使用する C_3H_8 ベースの生体組織等価ガス (C_3H_8 : 55%, CO_2 : 39.6%, N_2 : 5.4%の混合ガス) を使用し、基礎実験を進めている。生体組織等価ガスは、米 NASA の TEPC で使用しているものと同じである。いずれのガスを使用する場合も現状で圧力を 1 atm としている。

これまでに、既存の有効面積が $10 \times 10 \text{ cm}^2$ タイプの μ -PIC を使用した重イオン照射試験で、粒子の 3 次元飛跡、検出器内での付与エネルギー分布の取得、LET 分布の測定に成功している。更に、新たに開発した小型 ($2.6 \times 2.6 \text{ cm}^2$) の μ -PIC でも同様の試験を行い、データの取得を行っている。小型タイプでは、 $400 \mu\text{m}$ 間隔のストリップの隣同士を接続し $800 \mu\text{m}$ ピッチとしている。これらの実験結果については、ref.9, 10 に記載している。

3. 陽子照射実験について

これまでに照射した粒子としては、いずれも数百 MeV/n の Fe, Ar, Si, C, He イオンビームであるが、更に検出器内での付与エネルギーの小さい陽子ビームについても今回実験を行った。放射線医学総合研究所のサイクロトロン施設から供給される 70 MeV の陽子を照射した際に得られた 3 次元飛跡と付与エネルギー分布について Fig.1 に示す。ビーム窓出口におけるビームスポットサイズは 5 mm ϕ である。使用ガスは、生体組織等価ガスで、トリガーは検出器直前のシンチレータからの信号を利用しているが、セルフトリガーでのデータ取得も可能である。

3 次元飛跡のプロファイルについてはかなり広がりを持っているが、これは、ビームの空気中での散乱により、ビーム窓から数十 cm 離れた検出器付近でかなり広がるためである。以上より更に付

与エネルギーの小さい陽子ビームについてもデータ取得に成功した。データについては今後、更に解析を進める。

4. まとめと今後について

現状の検出器は、位置情報については、全ストリップを読み出しているが、収集電荷量についての情報は、陰極と陽極ストリップの出力の和のみを読み出しているため、今後、各ストリップを読み出せる方式の検出器を開発し、更に放射線検出器としての性能評価を細かく行う予定である。線量計自身は、最終的には ISS 等への搭載を目指す。

謝辞

本研究は、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、継続しております。ここに感謝申し上げます。

また、放射線医学総合研究所の HIMAC 施設の共同利用の一環として行われております。実験実施のために、ご協力いただきました HIMAC 関係者皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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).
- 2) Armstrong, T.W. and Colborn, B.L.; Predictions of secondary neutrons and their importance to radiation effects inside the international space station, *Radiat. Meas.* 33, 229 (2001).
- 3) Doke, T. et al.; Measurements of LET-distribution, dose equivalent and quality factor with the

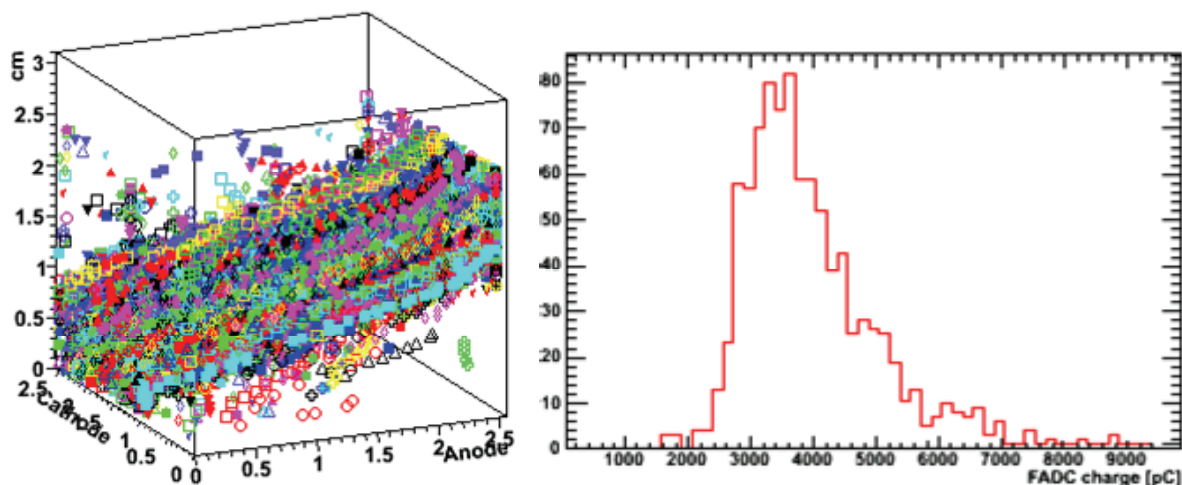


Fig. 1 Reconstructed 3-dimensional tracks (left) and the distribution of energy deposited in the detector (right) for the proton beam with the primary energy of 70 MeV

- RRMD-III on the Space Shuttle Missions STS-84, -89 and -91, *Radiat. Meas.*, **33**, 373 (2001).
- 4) 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).
 - 5) *NCRP Report* No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, (2002).
 - 6) 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
 - 7) 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).
 - 8) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001).
 - 9) Nagayoshi, T. et al.; Response of a Micro Pixel Chamber to heavy ions with the energy of several hundreds of MeV/n, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A581**, 110 (2007).
 - 10) Terasawa, K. et al.; Space Dosimetry with a Tissue Equivalent Position Sensitive Proportional Counter III, *Space Utilization Research*, **23**, 287 (2007).