

## 位置有感生体組織等価物質比例計数箱の開発と 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

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、高田淳史、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) and Establishment of Dosimetric Technique in the International Space Station (ISS) with PS-TEPC

*Kazuhiro Terasawa<sup>1,2</sup>, Tadayoshi Doke<sup>2,3</sup>, Yasunobu Fujita<sup>3</sup>, Jun Kikuchi<sup>3</sup>, Hisashi Kitamura<sup>6</sup>, Tatsuto Komiyama<sup>2</sup>, Hidetoshi Kubo<sup>4</sup>, Haruhisa Matsumoto<sup>2</sup>, Kentaro Miuchi<sup>4</sup>, Tsutomu Nagayoshi<sup>3</sup>, Hironobu Nishimura<sup>4</sup>, Kiamu Saito<sup>5</sup>, Shin-ichi Sasaki<sup>5</sup>, Atsushi Takada<sup>4</sup>, Koji Takeuchi<sup>3</sup>, Toru Tanimori<sup>4</sup>, Hiroko Tawara<sup>2,5</sup> and Yukio Uchihori<sup>6</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> Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sengen 2-1-1, Tukuba, Ibaraki, 305-8505

<sup>3</sup> Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Kikuicho 17, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044

<sup>4</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

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

<sup>6</sup> 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 under the “Ground-based Research Announcement for Space Utilization” promoted by Japan Space Forum. Heavy ions irradiation experiments were performed at HIMAC of NIRS to understand the response to heavy charged particles and a basic design of the PS-TEPC was completed.

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

宇宙に滞在する人々は、必然的に地表の100倍程度の線量率で宇宙放射線（陽子・重イオンといった荷電粒子と中性子）を被曝し続けることになる。この問題は、宇宙開発において最後まで残る根源的な問題の一つと言える。従って、JAXA長期ビジョンに従い、月・火星等への長期有人ミッションを実施するためには宇宙放射線線量計により被曝線量を管理する必要がある。更に宇宙船搭乗中を除いて、月・火星上での滞在場所は、不必要な被曝を避けるために、必然的に地下数mの地点に限定

されることとなる。その模式図をFig.1に示す。また、Ref.1の計算を元にとすると、地表で放射線業務従事者に適用される被曝線量限度（20 mSv/year）<sup>2)</sup>を達成するには、月面下約5 mに潜る必要がある。地表と同程度であれば、それ以上（約7 m）ということになる。但し、地下基地が完成するまでは継続的に被曝することになる。

宇宙飛行士が、スペース・シャトルや国際宇宙ステーション（ISS）上での短期滞在により、生涯実効線量当量限度<sup>3)</sup>を超えることは、超大型のフレア

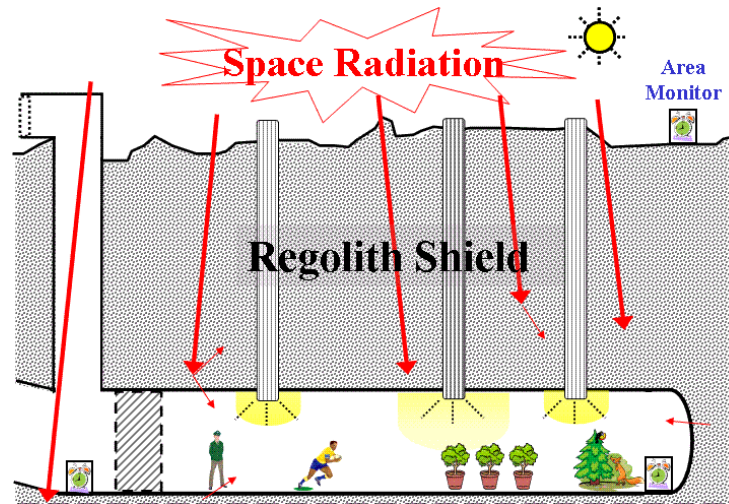


Fig.1 Schematic view of the Lunar and Martian underground base

発生時に船外活動をしている場合を除いて考えにくいですが、長期に渡って宇宙に滞在する場合、実質的にその滞在期間を決めるものは、宇宙放射線線量計の測定精度ということになる。

例えば、NASAが被曝管理に使用しているTEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter) は原理的なエラーのみで 51% ( $\sigma$ ) あり<sup>4)</sup>、その場合、97.7% の信頼度で生涯被曝線量限度を下回るには、測定器の指示値がその限度の半分に達したときに帰還を迫られることになる。これは、年のオーダーの有人ミッションの際に大きな障壁となる。Table1 に、測定器のエラーが 51, 30, 10% の場合の実質的な生涯被曝線量限度値を示す。以上より、長期ミッション実現に向けて、線量計の測定精度が要求されることとなる。NCRP-142 は、測定器のエラーで 30% 以内を要求している<sup>5)</sup>。

では、既存の線量計はというと、日本製の RRMD-III (Real-time Radiation Monitoring Device-III) が 3 度のスペース・シャトル搭載実験を行い、荷電粒子について十分な精度 (10% 程度) で測定を行っている<sup>6,7)</sup>。中性子については、BBND (Bonner Ball Neutron Detector) で熱中性子 (0.025 eV) から 15 MeV までの測定に成功している<sup>8)</sup>。丁度、STS-89 シャトル・フライトにおいて両者が搭載された機

会があり、その結果によると、線量全体に占める割合は、荷電粒子が約 8 割、中性子が約 2 割であった。ところが、中性子については原理的に測定が難しく、unfolding法を用いる場合に、大きなエラーを伴うので、注意が必要である。

従って、中性子について十分な測定精度を持った線量計の開発が必要となる。そこで、研究開発を開始したのが、PS-TEPC (Position-Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter) である。原理は、TEPCとRRMD-IIIの利点を取り入れ、ガス比例計数管に位置検出の機能を持たせたものである<sup>9)</sup>。更に、生体組織等価物質で構成し、中性子への感度も持たせ、荷電粒子同様、中性子についても、検出器中で発生した荷電粒子のLET (Linear Energy Transfer) を測定することで線量計測を行うという原理に基づく<sup>10,11)</sup>。以下、平成 16~18 年度に行った研究のまとめについて報告する。

#### ・ PS-TEPC の原理

ガス検出器に位置有感性を持たせるために選んだのは、近年、京大グループで開発された  $\mu$ -PIC (Micro-Pixel Chamber) であった<sup>12-14)</sup>。ストリップ電極と比例計数管を組み合わせた構造になっており、この電極を 2 次元位置検出部として利用し、Z 軸上の位置は、電離電子の移動を利用し Time Projection Chamber (TPC) として動作させることで 3 次元飛跡検出を実現している。現在、宇宙線物理学等への応用が進められているが、宇宙放射線線量計として利用するためには、まず重イオンの検出を試みる必要がある。まず、既存の  $\mu$ -PIC を利用し原理実証を行った。

#### ・ 10 cm 角 $\mu$ -PIC による重イオン検出<sup>15)</sup>

有効面積は  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  の  $\mu$ -PIC を用いて検出器を

Table 1 Net lifetime effective dose equivalent taking the error of measured value into consideration (C.L. 97.7%)

Male [age]	Lifetime effective dose equivalent [mSv]	Error of measured value $\sigma$ [%]		
		51	30	10
27~29	<b>600</b>	<b>299</b>	375	500
30~34	<b>900</b>	<b>448</b>	563	750
35~39	<b>1000</b>	<b>498</b>	625	833
40	<b>1200</b>	<b>597</b>	750	1000

構成し、放射線医学総合研究所の HIMAC 施設において重イオン照射実験を行った。照射したビームは、C: 400 MeV/n、Si: 800 MeV/n、Fe: 500 MeV/n の 3 種類である。その結果、3 次元飛跡観測、並びに検出器内への付与エネルギー分布の取得に、 $\mu$ -PICを用いた検出器で初めて成功した。また、付与エネルギーと、飛跡観測により得られた検出器内での粒子の経路長から求めた平均の LET 値は、計算値とほぼ一致 (5~10 %以内) する結果を得たことで、線量計として使用するための原理実証を行うことができた。

・ 2 cm角 $\mu$ -PICの開発と照射試験 <sup>16,17)</sup>

宇宙放射線線量計として使用するためには、できるだけ小さいものが望まれるので、TEPCやRRMD-IIIの大きさにならい、有効面積が 2.6 cm $\times$ 2.6 cm<sup>2</sup>の $\mu$ -PICを製作し、再度照射実験を行った。その結果、主要な重イオン (C、Si、Fe) に加えて、より軽いHeについても 3 次元飛跡の観測、付与エネルギー分布の取得に成功した。

・ 実用化へ向けた改良

検出器としての生体組織等価性を持たせるために、ドリフトケージをこれまでのワイヤーを使用したものから、導電性の生体組織等価プラスチックの A-150 を用いて製作したドリフト電極、shaping ringへの変更を行った。その写真をFig. 2に示す。封入するガスとして、プロパンガスを基調とする生体組織等価ガス (プロパン、二酸化炭素、窒素の混合ガス) を使用することで、有効領域は $\mu$ -PIC面以外、生体組織等価物質で構成されることになる。<sup>241</sup>Amアルファ線源を用いた実験で、アルファ線の 3 次元飛跡、並びに付与エネルギーの取得に成功し、検出器全体としてヘッドの部分については、ほぼ完成品に近い形を実現することに成功した。

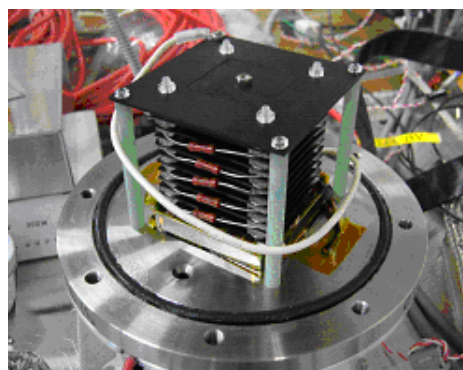


Fig.2 Photo of the drift cage consisting of the tissue equivalent plastic

・ まとめと今後について

最終的には、Fig. 3 に示すようにヘッド部分と回路部分を分け、検出器全体を組み上げる予定である。今後更に改良を行い、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) Angelis, G.D. et al.; Modeling of the Lunar Radiation Environment, *Nucl. Phys., B (Proc. Suppl.)* **166**, 169 (2007).
- 2) ICRP-60, Recommendations of ICRP Publication 60, *Annals of the ICRP* 21, Nos. 1-3, Pergamon Press, New York. (1991).
- 3) 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

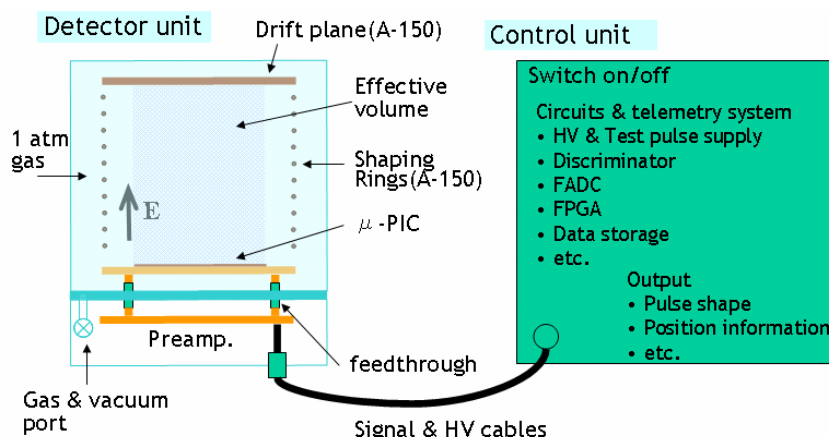


Fig. 3 A final design of PS-TEPC as a dosimeter

- 4) 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).
- 5) *NCRP Report No.142*, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, (2002).
- 6) 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).
- 7) Terasawa, K. et al.; Real-time measurement of LET distribution for space dosimetry by RRMD, *Ioniz. Radiat.*, **28**, 169 (2002).
- 8) 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).
- 9) 道家忠義; 宇宙放射線線量計測の進展、*放射線*, **20-3**, 51 (1994).
- 10) Terasawa, K. et al.; Scintillating fiber camera for neutron dosimetry in spacecraft, *Nucl. Instr. and Meth.* **A457**, 499 (2001)
- 11) Terasawa, K. et al.; Position-sensitive tissue equivalent proportional counter (PS-TEPC) for space dosimetry, *Proceedings of the 19th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses*, KEK, 63 (2005).
- 12) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001).
- 13) Kubo, H. et al.; Development of a time projection chamber with micro-pixel electrodes, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A513**, 94 (2004).
- 14) Miuchi, K. et al.; Performance and applications of a  $\mu$ -TPC, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A535**, 236 (2004).
- 15) 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).
- 16) Terasawa, K. et al.; Space Dosimetry with a Tissue Equivalent Position Sensitive Proportional Counter II, *Space Utilization Research*, **22**, 313 (2006).
- 17) Terasawa, K. et al.; Space Dosimetry with a Tissue Equivalent Position Sensitive Proportional Counter III, *Space Utilization Research*, **23**, 287 (2006).