

ISS 内における宇宙放射線線量計測用・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、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、勝田真登

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) for Space Dosimetry on board the International Space Station

Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Tetsuhito Fuse², Masato Katsuta², Yuji Kishimoto³, Hisashi Kitamura⁶,
Tatsuto Komiyama², Hidetoshi Kubo⁵, 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: Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) has been developed for space dosimetry. The detector establishes position sensitivity and tissue equivalency by 3-dimensional tracking with a gas time projection chamber and using tissue equivalent material. A flight model was manufactured and irradiated with heavy ion beams at HIMAC. The dosimetry onboard the International Space Station (ISS) is planned in the near future.

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

1. はじめに

地球周回低軌道上の国際宇宙ステーション (ISS) 等での滞在や月・火星への有人飛行の際には、太陽活動に伴う変化や地磁気圏内外の環境の違いはあっても、地上において自然界や人体・建物・食品等から受ける線量より 2 桁高いレベルを被曝することがこれまでの測定で明らかになっている。

宇宙滞在期間を決定する要因の一つが宇宙放射線被曝であり、ISS 上などで数か月にわたる長期滞在の際には、地上での職業人に適用されている被曝線量限度 (50mSv/year かつ、100 mSv/5years)¹⁾ を超えて、年齢と性別に依存した設定がなされており、概ね数百 mSv のオーダーである^{2,3)}。

2013 年の改訂³⁾による男性の線量限度を table 1

に示すが、これらはあくまで測定エラーがゼロの場合の数値であり、実際にはエラーが大きいと実質的な線量限度は低くなり、宇宙滞在期間に強い制限を加えることとなる。

月や火星への有人ミッションにおいては宇宙滞在の長期化は必至で、宇宙飛行士に対する被曝線量限度に迫るかそれを超えるような状況が想定されるため、地上での平常時においてはあまり問題とならない測定精度が重要となる。

更に月・火星長期滞在時には地球上のような大気による遮蔽が存在しないので、レゴリス自身等による厚いシールドにより被曝を最小限に抑える必要がある⁴⁾。

仮に、線量率を 1 mSv/d とし単純計算すれば、46 歳以上男性で宇宙滞在期間は 2.7 年となるが、table

Table 1 Net lifetime effective dose equivalent considering the errors of measured values (C.L. 97.7 %)

Male [age]	Lifetime effective dose equivalent [mSv]*	Errors of measured values σ [%]			
		10	30	51	100
27~30	6.0×10^2	5.0×10^2	3.8×10^2	3.0×10^2	2.0×10^2
31~35	7.0×10^2	5.8×10^2	4.4×10^2	3.5×10^2	2.3×10^2
36~40	8.0×10^2	6.7×10^2	5.0×10^2	4.0×10^2	2.7×10^2
41~45	9.5×10^2	7.9×10^2	5.9×10^2	4.7×10^2	3.2×10^2
46 ≤	10×10^2	1.0×10^2	6.3×10^2	5.0×10^2	3.3×10^2

中の各エラーの値（10、30、51、100）を想定すると、2.3、1.7、1.4、0.9 年となり、半分程度になる可能性もあり⁵⁾、現状で30%以内が推奨されている⁶⁾。

線量測定の対象となる宇宙放射線の種類の内訳はかつてのスペース・シャトル STS-89 における Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III)⁷⁾と Bonner Ball Neutron Detector (BBND)⁸⁾での実測で、荷電粒子が8割、中性子が2割となっているが、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るため、注意が必要である。

これまで Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC)⁹⁾や RRMD-III 等の能動型検出器で線量の実測が行われてきたが、中性子への感度、荷電粒子に対する測定精度を考慮することで、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)の開発に踏み切った¹⁰⁾。

2. PS-TEPC について

PS-TEPC の検出部は、ガス Time Projection Chamber (TPC)で構成されている。米 NASA が標準検出器として採用している TEPC では位置情報が得られず、幾何学的な原理的系統誤差が大きい(51%)。その点を解消するための手段として、3次元的な飛跡を観測することで位置検出を行い、付与エネルギーについての情報と併せて、線量測定に必要な物理量である Linear Energy Transfer (LET)を近似計算することなく実測している。測定対象となる LET 範囲は、0.2~1000 keV/ $\mu\text{m-water}$ である。

2次元位置検出部には、Micro-Pixel Chamber ($\mu\text{-PIC}$)¹¹⁾というストリップ電極の一種を使用している。

検出部の有効体積を形成するドリフト領域を決定するためのドリフト面、電場整形リングの各電極を導電性の生体組織等価プラスチック、検出媒体としてのガスとして生体組織等価ガスを使用することで、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 (CH_4 : 64.4%、 CO_2 : 32.4%、 N_2 : 3.2%)を最終的に使用することに決定している。

3. これまでの結果と今後について

大型タイプ（有効領域が10 cm × 10 cm × 10 cm）による重イオン照射試験による動作実証にはじまり¹²⁾、その後、小型試作機による実証を行い^{13,14)}、測定精度について、LET 全体に対して、 $\sigma = 30\%$ 以下を達成できる見込みとなった。続いて、検出部のみについて Bread Board Model (BBM)の製作し、重イオン照射試験を行い、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¹⁵⁾。

更に、検出部と制御部の両方について、Flight Model (FM)の製作を行い、最初の照射実験を行った。



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

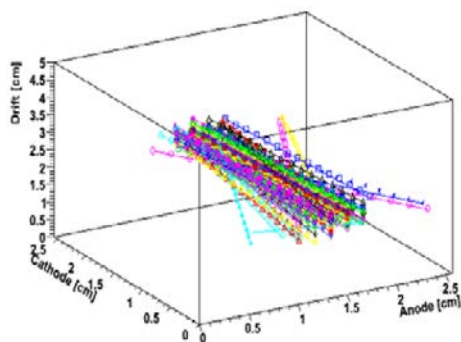


Fig.2 Reconstructed 3-dimensional tracks observed by the flight model. Irradiated particles are ^{56}Fe ions with the energies of 500 MeV/n.

Fig.1 に FM の写真を示す。左側の円筒部と直方体部が検出部で、円筒部がガス領域となっている。右側が制御部である。

Fig. 2 に放射線医学総合研究所 HIMAC から供給された ^{56}Fe ビーム (500 MeV/n) 照射によって観測された 3 次元飛跡を示す。有効体積のサイズは、2.5 cm × 2.5 cm × 5 cm である。

概ね良好な結果を得ているが、一部ソフトの改修やハードの交換等を行い、現在、照射試験を継続中である。

今後は各環境試験等も行い、来年度以降に ISS 上にて、軌道上での実証実験を計画している。

参考文献

- 1) ICRP Publication 60; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection., Pergamon Press, New York, Ann. ICRP 21 (1991).
- 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) 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).
- 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 Counter (PS-TEPC) for Space Dosimetry, *SUR*, **25**, 57 (2009).
- 6) NCRP Report No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements, (2002).
- 7) 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).
- 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) 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).
- 10) Terasawa, K. et al.; Position-sensitive tissue-equivalent proportional counter (PS-TEPC) for space dosimetry, *KEK Proc.* **2005-12**, 63 (2005).
- 11) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) Kishimoto, Y. et al.; Basic performance of a position-sensitive tissue-equivalent proportional chamber (PS-TEPC), *Nucl. Instr. Meth.*, **A732**, 591(2013).
- 15) 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).

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継続版
- ・ 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/調査グループ