

国産能動型宇宙放射線線量計の開発状況（2023年の現状について）

寺沢和洋（慶大医¹/JAXA²）、佐々木慎一、岸本祐二、高橋一智（KEK³）、
窪田雅弓（総研大⁴）、永松愛子（JAXA²）、身内賢太郎（神戸大⁵）、小平聡（QST⁶）

Present status for development of active space dosimeters in Japan (2023)

*Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Yuji Kishimoto³, Masami Kubota⁴, Kentaro Miuchi⁵, Aiko Nagamatsu²,
Shin-ichi Sasaki³, Kazutoshi Takahashi³ and Satoshi Kodaira⁶*

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 The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Shonan Village, Hayama, Kanagawa,
240-0193

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

⁶ National Institutes for Quantum Science and Technology, Anagawa 4-9-1, Inage, Chiba, 263-8555

Abstract: A new μ -PIC, whose structure was reconstructed to improve gas gain, was installed on the flight model onboard the ISS. The irradiation tests were performed at a physics beamline (PH2) of HIMAC. Signals from a proton beam with the energy of 230 MeV were successfully acquired with promising results in terms of resolution.

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

1. はじめに

これまでに、国産の能動型宇宙放射線線量計としては、Si 位置検出器の組み合わせた Real-time Radiation Monitoring Device (RRMD)を用いた5度にわたるスペース・シャトル内での実測¹⁾、特に Double-sided Si Strip Detector (DSSD)を3枚用いた RRMD-III については、3度の実測を果たし、NASA の Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC、低圧ガスの生体組織等価比例計数管)²⁾やドイツの DOSimetric TELscope (DOSTEL、Si 検出器2枚の組み合わせ)³⁾とのシャトル内での実測値の比較を行ってきた。

それらの比較実験の結果から、National Council on Radiation Protection and Measurements-142 (NCRP-142)⁴⁾等での検出器に依存した測定エラー30%以内という推奨が、各線量計間で達成できていないことが明らかになった¹⁾。

宇宙放射線の主要な被曝の対象は、数百 MeV/n 付近の荷電粒子線（銀河宇宙線）で、地球周回低軌道上においては、定常的な被曝として、放射線帯の低エネルギー陽子や、これらの一次荷電粒子線が宇宙船の船壁や搭載物といった周辺の物質と相互作用して発生する、二次粒子（特に、中性子）が被曝に付加される。

線量率は1 mSv/d のオーダーで、太陽活動や地磁気圏内外といった条件に依存し（銀河宇宙線のフラックスは太陽活動と逆相関）、荷電粒子と中性子の被曝線量の割合は、スペース・シャトル STS-89 内での実測によると、この条件での中性子の割合は20%程度と推定される⁵⁾。

線量の評価方法としては、通常、線量当量 H（或いは、その類型）で評価し、H は吸収線量 D と線質係数 Q の積である⁶⁾。生物学的効果の指標である Q は LET の関数として与えられているおり、LET の実測は吸収線量の実測にも直結し、この方式での線量計測の本質といえる。

LET は、検出器内での付与エネルギーを粒子の飛跡に沿った経路長で割り算することで求めることができる。

そもそも、TEPC や DOSTEL には位置検出機能がないため、LET を直接測定することはできず、検出器への粒子の入射方向の一樣等方性を仮定した場合の応答関数を利用し、近似の LET を得るのみで、幾何学的な形状に依存した系統誤差が存在することになる⁷⁾。もしくは、既知の応答関数から deconvolution process を経て、LET を得ることもできるが、その場合は、能動型でありながら実時間測定できず、これらがトレードオフの関係にある。

一方、RRMD-III は位置検出器で構成され、LET を直接実測でき、原理的には前述の系統誤差が存在しないが、Si 検出器であるため、中性子への感度は期待できず、その点で、生体組織等価物質で構成される TEPC に劣る。

そこで、両検出器の特徴であるところの、生体組織等価性と位置有感性の両方を兼ね備えた新たな線量計として、Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC)⁸⁾を開発し、International Space Station (ISS) 内の日本実験棟「きぼう」内に設置し、2016 年末に H-II Transfer Vehicle -6 (HTV-6) による打ち上げで ISS へ輸送後、1.4 年間に渡り、軌道上での実測を果たした。

ISS に設置のフライトモデルについて 2019 年に地上への回収を果たし、物理的な損傷がないことを確認、更に、信号の劣化があったものの、ガス置換により、再びフライト前の性能へ回復することを実証した。現在、線量計としての改修・改良を行っている。その内容について報告する。

2. PS-TEPC の ISS フライトモデルの検出部について

PS-TEPC は生体組織等価ガスを検出媒体として利用した 3 次元飛跡検出器である。2 次元位置検出部として、ストリップ電極の一種である Micro-PIXel Chamber (μ -PIC)⁹⁾を採用している。荷電粒子入射により気体が電離し、電離電子を電場に従ってドリフトさせ、ドリフト速度と電極への到達時刻からドリフト方向の座標を求め、 μ -PIC で得た 2 次元情報と併せて 3 次元となる (Time Projection Chamber, TPC)。

再構築した 3 次元飛跡から、粒子の検出器内での経路長を求め、付与エネルギーと合わせて LET を実測することができる。Fig.1 に PS-TEPC の概念図を示す。

厚さ 100 μm のポリイミド製の基板をベースに、両面に陰極・陽極ストリップが 400 μm ピッチで互いに直交するように配列され、基板を貫いて陰極ストリップの円形の穴の中心に直径 50 μm の陽極ピクセルが形成されている。このピクセルの近傍に高電場をつくることで、一つ一つを比例計数管として動作させ、 dE/dx の小さい気体中でも、信号を取り出すことができる。

フライトモデルとしては、400 μm ピッチの電極を 4 本ずつ接続し、陰極・陽極はそれぞれ 16 チャンネルずつで x と y の 2 次元を構成し、全体として、 $2.5 \times 2.5 \times 5 \text{ cm}^3$ の有感領域を持つ。

検出媒体としてメタンベースの生体組織等価ガス (CH_4 : 64.4%, CO_2 : 32.4%, N_2 : 3.2%)、ドリフトケースに伝導性の生体組織等価プラスチックを使用している。以上が検出部の構成で、フライトモデルは、検出部 2 つと制御部 1 つから成っている。

3. 長期安定動作に向けた取り組み

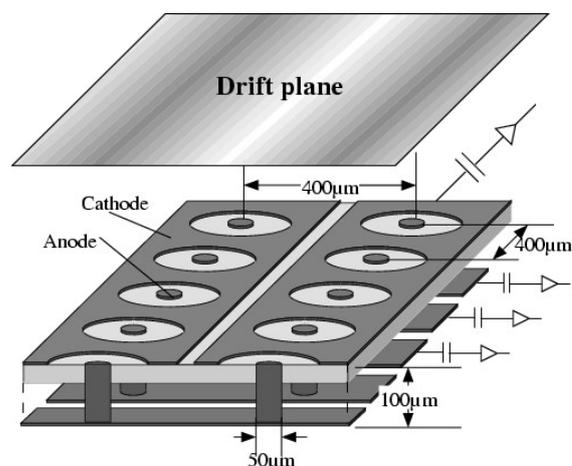


Fig. 1 Schematic view of μ -PIC

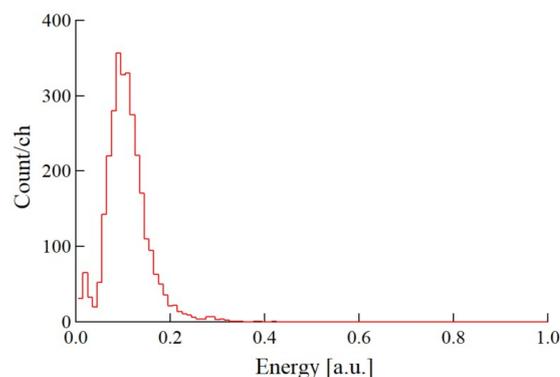


Fig. 2 Energy distribution obtained by irradiating PS-TEPC equipped with the new μ -PIC with a 230 MeV proton beam at a physics beamline of HIMAC.

フライトモデルの検出部の 1 つを改修し、 μ -PIC 既存品から、構造や電場の漏れを再検討し、ゲイン向上を目指した試作の μ -PIC に置き換えた。試作品によりゲイン向上が見込めれば、S/N の改善による分解能の向上、相対的な低電圧での運用による放電の抑制、より詳細な dE/dx の測定が可能となり、これらは長期安定動作につながる。

α 線源を用いた予備実験で従来品より 2-3 倍のゲイン向上が見込め、続いて、量子科学技術研究開発機構・HIMAC 物理汎用照射室において、230MeV 陽子線を照射した。その際のエネルギースペクトルを Fig.2 に示す。

分解能として、従来品と同等かそれ以上の結果となり、今後、継続して照射実験を行い、他粒子の照射と共に、より定量的に評価する予定である。

前年度に生物照射室での測定を行っているが¹⁰⁾、検出器への全面照射がメインで、数 $\text{cm}\phi$ のビーム径

であるが、物理汎用照射室では数 $\text{mm}\phi$ のビーム径で、分解能の評価向きであり、事実、生物照射室での測定より優れた結果となった。

space., *SUR*, 37, 1-3 (2023).

謝辞

PS-TEPC は、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(現、量子科学技術研究開発機構)・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/調査グループで行っておりました研究の継続版

参考文献

- 1) Terasawa, K. et al.; Real-time measurement of LET distribution for space dosimetry by RRMD, *Ioniz. Radiat.*, 28-2, 169 (2002).
- 2) 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).
- 3) Beaujean, R. et al.; Recent European measurements inside Biorack, *Mut. Res.* 430, 183-189 (1999).
- 4) NCRP Report No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements (2002).
- 5) 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).
- 6) ICRP Publication 60; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, New York, Ann. ICRP 21 (1991).
- 7) T. Doke 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.*, 43-6, 3576 (2004).
- 8) Terasawa, K. et al.; Position-sensitive tissue equivalent proportional counter (PS-TEPC) for space dosimetry, *KEK Proc.*, 18th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 63-73 (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) Terasawa, K. et al.; Development of space dosimeters and limitations on length of stay in