

# 国産能動型宇宙放射線線量計の開発状況と将来展望

慶大医/JAXA 寺沢和洋

KEK 佐々木慎一、岸本祐二、高橋一智

JAXA 永松愛子

神戸大 身内賢太郎

QST 小平聡

## Development status and future prospects of active radiation dosimeters for space use in Japan

*Kazuhiro Terasawa<sup>1,2</sup>, Yuji Kishimoto<sup>3</sup>, Kentaro Miuchi<sup>4</sup>, Aiko Nagamatsu<sup>2</sup>, Shin-ichi Sasaki<sup>3</sup>, Kazutoshi Takahashi<sup>3</sup> and Satoshi Kodaira<sup>5</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> Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sengen 2-1-1, Tukuba, Ibaraki, 305-8505

<sup>3</sup> Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>4</sup> Graduate School of Science, Kobe University, Rokko-dai 1-1, Nada-ku Kobe Hyogo, 657-8501

<sup>5</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology, Anagawa 4-9-1, Inage, Chiba, 263-8555

Abstract: Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) continues to operate stably even after returning to Earth after one year of operation onboard the International Space Station (ISS). Even after more than three years have passed since the pre-launch gas injection into the detector, it has successfully acquired signals to the protons, and has almost recovered its pre-launch performance after the gas exchange. And now, a new type of electrode with higher gas gain is under development.

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

### 1. はじめに

宇宙で活動する宇宙飛行士・宇宙旅行者は、宇宙放射線により定常的な被曝を受ける。その被曝線量率は地磁気圏内外や太陽活動極大・極小といった条件により変動するが 1 mSv/d のオーダーで、その被曝の対象となるのは、sub-GeV/n 領域のエネルギーを持つ荷電粒子線（銀河宇宙線）が主である。

地球周回低軌道上では、放射線帯内の低エネルギー陽子による寄与が付加され、以上の一次荷電粒子線が宇宙船の船壁や搭載物と相互作用して発生する、二次中性子が被曝に付加される。更に、超大型の太陽フレア発生時には、薄いシールド越しであれば、前述の定常被曝に更に Sv オーダーの被曝が追加されることも念頭に置く必要がある。

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 8:2 程度であるが<sup>1)</sup>、実測例は少なく、また中性子の寄与は周辺の物質に大きく依存し、厚いシールド越しで

は荷電粒子と同等になることもある。また、中性子線量測定は大きな誤差 (factor 2 以上) を含む場合が大半で注意が必要である。

ICRP-60<sup>2)</sup>によると、地表における職業人の被曝線量限度は、1年で 50 mSv、5年間の積算で 100 mSv（平均 20 mSv/y）であるが、国際宇宙ステーション (International Space Station, ISS) 内で活動する宇宙飛行士に対しては、生涯被曝線量限度として、数百 ~ 1000 mSv 程度が設定されている<sup>3)</sup>。

今後、月周回軌道上の新宇宙ステーション Gateway や月面、火星表面等へ長期の有人飛行・宇宙滞在となれば、宇宙飛行士の線量限度の変更や、何らかの被曝低減の手段が必要となる。例えば、月面上で地球大気並みの宇宙放射線シールド効果を想定すると、月面下数 m 程度が必要となる。月周回衛星かぐや (SELENE) によって月表面における縦穴の存在が明らかになったが<sup>4)</sup>、月表面の線量率が 1 mSv/d とすると、仮に、直径 50 m、深さ 50 m

の縦穴の底では、単純計算では、前述の地表職業人の 20 mSv/y 程度になると推定できる。

以上より、そもそも真値（答え）の存在しない、宇宙放射線による被曝を長期安定的に実測評価し続けることは必須で、既存の能動型線量計で存在する、factor 2 にも迫るような大きな誤差 (TEPC: Tissue Equivalent Proportional Counter と RRMD-III: Real-time Radiation Monitoring Device-III) <sup>5)</sup> は許容されず、各国・各研究機関等が独立に異なるアプローチで、相互比較していくことが肝要である。

## 2. 宇宙放射線線量の評価法について

被曝線量を直接測定することはできず、実測する（できる）物理量によって、評価のプロセスは異なるが <sup>6)</sup>、通常、線量当量 H で評価する。H は吸収線量 D と線質係数 Q の積である。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ため、LET の実測が線量計測の本質である。LET 以外に、LET の近似量や検出器内の付与エネルギーのみの実測に基づく線量計も存在するが、加速器による相互比較実験により、LET の実測に基づき線量評価する RRMD-III が最も測定精度の高い線量計であることが示されている <sup>7,8)</sup>。

LET を実測すれば、D と Q を直接評価することができるが、物理量として実測できるのは D と LET のみで、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。

今後、生物学的効果の再評価により線質係数の再定義が想定されるが、その際も、LET 以外の物理量に紐づいた評価法になることは、同じ歴史を辿ることを想定すると考えにくく、その際に、過去の実測を再評価するためにも、LET の実測は必須である。

実効線量当量についての実測は銀河宇宙線のエネルギースペクトルを網羅する必要があり、それを達成するための massive な検出器は、衛星や宇宙船内等でのリソースが限られている場合は非現実的で、広範なエネルギー範囲に渡るデータの一部取得に限定される。

## 3. ガス 3 次元飛跡検出器 PS-TEPC について

位置有感で検出器内の付与エネルギーを実測できると LET の直接評価につながるが、その方法としては、①位置有感半導体検出器 <sup>9)</sup>、②シンチレーションファイバーの組み合わせ <sup>10)</sup>、③位置有感ガス検出器 <sup>11)</sup> 等が考えられ、この内、検出器を生体組織等価物質で構成し、測定対象となる中性子のエネルギー下限をできるだけ下げられる可能性を想定すると、③が有力である。

そこで、生体組織等価物質（検出媒体とドリフトケージ）で構成された位置検出器として、PS-TEPC (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber) を開発した <sup>11)</sup>。PS-TEPC は TPC (Time Projection Chamber) であり、2 次元位置検出器として、ストリップ電極の一種である、Micro-PIXel Chamber ( $\mu$ -PIC) <sup>12)</sup> を使用している。入射粒子の 3 次元飛跡を再構築し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 (特に  $\mu$ -PIC) の概念図を示す。

厚さ 100  $\mu$ m 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  $\mu$ m 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  $\mu$ m 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働かせることができる。

400  $\mu$ m 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 次元の位置情報と各チャンネル毎の付与エネルギーの情報を得ることができる。また、電離電子のドリ

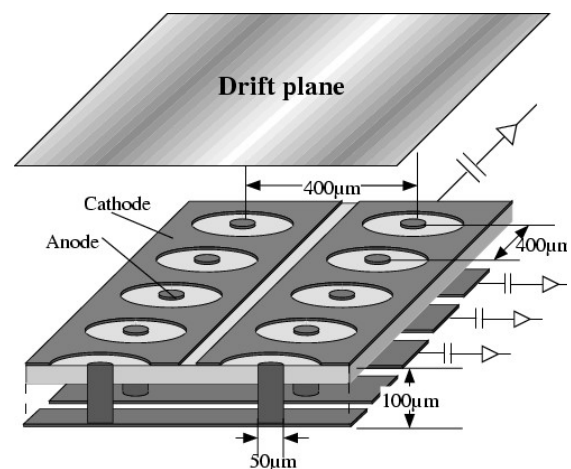


Fig. 1 Schematic view of  $\mu$ -PIC

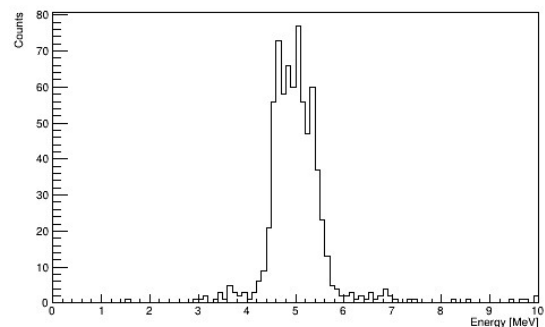


Fig. 2 Distribution of the deposit energy by the irradiation of Fe particles with the energies of 500 MeV/n

フト方向の時間情報とドリフト速度から z 軸の位置を得る。 $2.5 \times 2.5 \times 5 \text{ cm}^3$ の有感領域を持ち、各粒子の3次元的な飛跡を観測することができる。

検出媒体としてメタンベースの生体組織等価ガス ( $\text{CH}_4$ : 64.4%、 $\text{CO}_2$ :32.4%、 $\text{N}_2$ :3.2%)、ドリフトケージとして導電性の生体組織等価プラスチックを使用している。

NCRP<sup>13)</sup>等で、検出器に依存した測定精度で30%以内が推奨されているが、加速器による粒子照射により、その測定精度を達成し<sup>14)</sup>、2016年12月にHTV-6号機にて打ち上げ後ISS内に設置し、2018年4月までの約1.4年間に渡り、物理的な損傷なしに動作させることに成功した。homogeneousな検出器として、宇宙放射線の3次元的な飛跡の取得に初めて成功、更にLET分布を取得し、2019年に地上への回収を果たした。

#### 4. PS-TEPCの長期安定動作に向けた取り組み

- ・地上回収後の信号取得

ISSへの打ち上げ前にガスを封入した後、3年半以上、ガス交換を行わない状態で、Proton 230 MeVに対する信号取得に成功<sup>15)</sup>、更に、簡単なガス交換後に、打ち上げ前の性能(分解能)をほぼ達成した。量子科学技術研究開発機構HIMAC施設における、Fe 500 MeV/n照射に対する付与エネルギー分布について、Fig.2に示す。 $\sigma$ で7%程度となった。

- ・ $\mu$ -PICの改良

構造や電場の漏れを再検討し、ゲイン向上を目指した電極の試作を行った。回収を果たしたFlight Model (FM)の検出部を一部改修し試作品を取り付け、アルファ線による予備実験を行った。その結果、従来品よりも2~3倍高いガスゲインを達成した。今後、加速器による粒子照射を行い、応答評価を行う予定である。

これにより印加電圧を1割程度下げることができ、放電等を抑えることでの一層の安定化を図ることが可能となる。また、S/Nの向上により、信号の読み出しを増やすことができれば、より詳細なデータ解析(dE/dxの比較、粒子弁別等)も期待できる。

以上のような改善を通して、最終的には火星往復を想定した、3年以上の長期運用に耐えうるような実機の開発を目指す。

#### 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行っていました研究の継続版

#### 参考文献

- 1) 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).
- 2) ICRP Publication 60; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press, New York, Ann. ICRP 21 (1991).
- 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) Haruyama, J. et al.; Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21206 (2009).
- 5) Terasawa, K. et al.; Real-time measurement of LET distribution for space dosimetry by RRMD, *Ioniz. Radiat.*, 28-2, 169 (2002).
- 6) Terasawa, K.; Problem of neutron dosimetry in space, *Spa. Radiat.*, 3-3, 157 (2002).
- 7) HIMAC Report 078, Results from the first two InterComparison of dosimetric instruments for Cosmic radiation with Heavy Ions Beams at NIRS (ICCHIBAN-1&2) Experiments (2004).
- 8) 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).
- 9) T. Doke 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).
- 10) K. Terasawa et al.; Scintillating fiber camera for neutron dosimetry in spacecraft, *Nucl. Instr. Meth.* A457, 499 (2001).
- 11) 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).
- 12) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. Meths.*, A471, 264 (2001)
- 13) NCRP Report No.142, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and

Measurements (2002).

- 14) Terasawa, K. et al.; Development of Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) as an active dosimeter, *SUR*, 31, 1-3 (2017).
- 15) 寺沢和洋、他: 位置有感比例計数管の重イオンに対する応答、放射線医学総合研究所・重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書 (2021).