

宇宙放射線線量計測器 PS-TEPC の長期運用のための取り組み

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

Efforts for long-term operation of a space dosimeter named PS-TEPC

Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Yuji Kishimoto³, Kentaro Miuchi⁴, Aiko Nagamatsu², Shin-ichi Sasaki³, and Kazutoshi Takahashi³

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

Abstract: An active space dosimeter named Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional Chamber (PS-TEPC) has worked stably for 1.4 years inside the Japan Experimental Module (JEM) of the International Space Station (ISS) since December, 2016. The detector can measure the deposit energy and the chord length in the detector by reconstructing the three-dimensional tracks of incident particles. Some efforts for long-term operation are described.

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

1. はじめに

2000年以降、地球周回低軌道上の国際宇宙ステーション (ISS) 内での長期宇宙滞在が本格化し、定常的に数名の宇宙飛行士が半年程度滞在するようになった。今後は月周回軌道上の新宇宙ステーション「Gateway」の建設が開始され、月や火星等への更なる長期の有人飛行・宇宙滞在を迎えるにあたり、より深刻化する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ある。

被曝線量は、地磁気圏内外・太陽活動時期や周辺の環境 (物質) などの条件によって変化するが、定常的な被曝源となる銀河宇宙線による線量率は、数百 μ Sv/d から 1 mSv/d 前後で、地磁気圏外での被曝が主となる火星への有人飛行の際には、約 3 年かそれ以上の宇宙滞在となることが想定され、ISS 内で活動する宇宙飛行士向けの生涯被曝線量限度 (数百 ~ 1000 mSv 程度)¹⁾ の変更も余儀なくされる場所である。更に、超大型の太陽フレアが発生すれば、薄いシールド越しであれば、その影響が Sv オーダーで加わることも念頭に置く必要がある。

従って、かつてのスペース・シャトル内での実測で生じた factor 2 にも迫るような大きな誤差 (RRMD-III: Real-time Radiation Monitoring Device-III と TEPC: Tissue Equivalent Proportional Counter)²⁾ は

許容されず、各国・各研究機関等が異なるアプローチで、独立に、かつ常に実測し、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

実測に基づく被曝線量は、通常、線量当量 H で表され、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 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。

実効線量 E についての実測は massive な検出器を用いて、月面上等、十分なリソースを供給できるような場所であれば今後実測していくこともありうるが (calorimetric dosimetry)、衛星や宇宙船内ではサイズ・重量・電力などの制限から、広範なエネルギー範囲に渡るデータの一部取得はできるものの、網羅的にはなりにくい。宇宙放射線線量の実測法、評価法については過去の文献を参照されたい³⁾。

3. ガス 3 次元飛跡検出器 PS-TEPC について

米NASAが標準検出器として採用しているTEPCは、円筒形や球形の低圧ガス比例計数管で、生体組織等価物質で構成されている。宇宙放射線粒子の入射方向の一様等方性を仮定し、検出器内での平均経路長を利用したLETの近似計算(y値)から線量を算出している。

一方、RRMD-IIIはSi位置検出器3枚で構成され、入射粒子毎のLETの直接測定ができるが、TEPCのような中性子への感度は期待できず、また、視野が限定されるため、全方向を一度に網羅することができない。その後、全方向性を持った、サイコロ型のRRMD-IVが試作されたが²⁾、依然として荷電粒子用のままである。

そこで、両線量計の利点を活かすには、生体組織等価物質で構成された位置検出器が必要で、それを実現したのが、PS-TEPC (Position-Sensitive Tissue-Equivalent Proportional-Chamber)である⁴⁾。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 (μ -PIC)⁵⁾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 μ -PIC)の概念図を示す。

厚さ100 μ 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 μ 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 μ 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。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、電離電子のドリフト方向の時間情報とドリフト速度

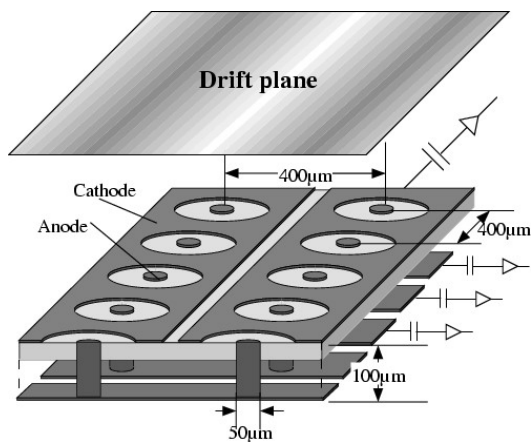


Fig. 1 Schematic view of μ -PIC

からz軸の位置情報を得る。以上より、TPCとして働かせ、各粒子の3次元的な飛跡を観測することができる。フライトモデルとしては、ストリップピッチ程の位置分解能は必要とせず、隣り合う4本を1チャンネル分としてそれぞれ信号を読み出す。

PS-TEPCは、能動型宇宙放射線線量計に必要な条件としての、測定精度・LET測定範囲・イベント毎の評価・全方向性・位置検出・中性子感度などの項目を全てクリアし、特に、入射粒子の一様等方性を仮定できないような環境下(厚いシールド越し、天体表面、月面縦穴内・底近辺など)においては、データ補正のために、全方向に感度を持ち、粒子の入射位置や角度の情報を取得できるPS-TEPCのような線量計が求められる。

4. これまでの国産能動型宇宙放射線線量計の長期安定動作について

RRMD-IIIについては、スペース・シャトルでの3回のフライト(STS-84、-89、-91)で実測を果たし、最初のフライトから約1年経過後の3回目のフライトや、地上での各国の加速器を利用した線量計相互比較実験で、製造から約10年経過した後も、正常な動作を確認している。

PS-TEPCについては、2016年12月にHTV-6号機にて打ち上げ、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、2019年に地上への回収を果たした。

5. PS-TEPCの長期安定動作に向けた取り組み

・ゲインマップの取得

μ -PICの各チャンネルを比例計数管として動作させた場合のガスゲインにはチャンネル毎にばらつきがあり、粒子の検出器有効領域への全面照射を通して、ゲインマップを取得し、データ補正することで分解能を向上させることができ、長期安定動作につなげることが可能となる。全体で1~2割程度のゲインのばらつきがあるが⁶⁾、マップの適用により、その分の分解能向上を確認している。

・ μ -PICの改良

構造上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が進行中である。ゲインが2~3倍になれば、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目指す。

・封入ガスについて

現状で、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%)を使用しているが、Molecular Sieves(物理吸着)やGetter(化学吸着)を使用し純化する方法や、相対的に電離電子の移動速度が速いArエタンガス(Ar:90%、 C_2H_6 :10%)を

使用することで、不純物の影響を受けにくくするような取り組みも検討している。

以上のような改善を通して、最終的には軌道上で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・HIMAC 施設共同利用研究課題、サイクロトロン施設研究課題
- ・ 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) 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).
- 2) Terasawa, K. et al.; Real-time measurement of LET distribution for space dosimetry by RRMD, *Ioniz. Radiat.*, 28-2, 169 (2002).
- 3) Terasawa, K.; Problem of neutron dosimetry in space, *Spa. Radiat.*, 3-3, 157 (2002).
- 4) 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).
- 5) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. Meths.*, A471, 264 (2001)
- 6) 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 (2019, 2020).