

## 生体組織等価位置有感比例計数管による宇宙放射線線量当量計測器の開発 III

JAXA/早大 寺沢和洋、道家忠義  
 早稲田大学 永吉勉、藤田康信、石田幸司、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  
 KEK 佐々木慎一、俵裕子、齋藤究  
 JAXA 松本晴久、込山立人  
 放医研 内堀幸夫、北村尚

## Space Dosimetry with a Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (III)

*Kazuhiro Terasawa<sup>1,2</sup>, Tadayoshi Doke<sup>1,2</sup>, Yasunobu Fujita<sup>2</sup>, Koji Ishida<sup>2</sup>, Jun Kikuchi<sup>2</sup>, Hisashi Kitamura<sup>5</sup>,  
 Tatsuto Komiyama<sup>1</sup>, Hidetoshi Kubo<sup>3</sup>, Haruhisa Matsumoto<sup>1</sup>, Kentaro Miuchi<sup>3</sup>, Tsutomu Nagayoshi<sup>2</sup>,  
 Hironobu Nishimura<sup>3</sup>, Kiamu Saito<sup>4</sup>, Shinichi Sasaki<sup>4</sup>, Atsushi Takada<sup>3</sup>, Toru Tanimori<sup>3</sup>,  
 Hiroko Tawara<sup>4</sup> and Yukio Uchihori<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Space Technology and Aeronautics, Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen  
 2-1-1, Tukuba, Ibaraki, 305-8505

E-Mail: terasawa.kazuhiro@jaxa.jp

<sup>2</sup> Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, Kikuicho 17,  
 Shinjuku-ku, Tokyo, 162-0044

<sup>3</sup> Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto,  
 606-8502

<sup>4</sup> Radiation Science Center, High Energy Accelerator Research Organization, Oho 1-1,  
 Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0801

<sup>5</sup> National Institute for Radiological Sciences, Anagawa 4-9-1, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

**Abstract:** We started to develop a new space dosimeter named “Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC)” with tissue equivalency and position sensitivity. This detector consists of the Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC) which is a kind of the micro-pattern gas detector. Heavy ions irradiation experiments were performed at HIMAC of NIRS using the detector with the sensitive volume of  $26 \times 26 \times 55 \text{ mm}^3$ .

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

### 1. はじめに

宇宙環境は、地表の環境とは大きく異なり、具体的には、真空、微小重力、宇宙放射線・紫外線の存在、極端な温度変化・温度差があり、閉鎖的環境であることが挙げられる。従って、これらの厳しい条件下での安全性の確保や、月や火星へのミッションやそこでの長期滞在の際に必要なとされる、エネルギーの安定的な供給、生命維持システムの確立といったことが課題となっている。

安全性の確保といった場合に、最も問題になることの一つは、宇宙放射線による定常的な被曝である。大気のない月面もしくは大気が希薄な天体（火星の大気は地球の1%）においては、宇宙放射線による被曝から決して逃れることができない。従って、月、火星の表面での滞在時は宇宙船内での滞在時と同程度かそれ以上の宇宙放射線被

曝を絶えず受けることになるであろう。更に、十分な遮蔽体のないまま超大型の太陽フレアに遭遇した際には、たちまち致死量に至る被曝を受けることになろう。

唯一、地下深く潜ることで回避できるが、地球の大気と同等のシールド効果を考えれば、水で10 mのシールドが必要で、これは建物の地下4, 5階相当になる。最初に長期滞在を想定し、月や火星に向かう人類は、地下基地が完成するまで、おそらく年のオーダーの期間に渡り、宇宙放射線被曝を受け続けることになる。

宇宙滞在によって受ける放射線被曝は、低線量率ではあるものの、地表より2オーダーも高く、月面基地での居住や火星への有人ミッションの際には、トータルでSvオーダーの被曝線量に達することが必至である。従って、地表で放射線作業に

従事する職業人へ適用される被曝線量限度を宇宙飛行士へそのまま当てはめることは困難であるため、致死性の癌によって死ぬ確率が3%以内<sup>1,2)</sup>というリスクの高い設定にならざるを得ない。このことは人数が少ない場合はよいが、仮に100人がこの線量限度ぎりぎりになるまで宇宙に滞在したとすると、確率論的には放射線被曝により3人が犠牲になることを示している。

この確率は、高線量率下での短期被曝であった広島、長崎のデータを元に推定されている。故に、この推定をそのまま宇宙へ適用してよいかという問題は依然として残るものの、線量計測器の測定精度が悪いと宇宙での滞在期間に必要な以上の制限を与えてしまうことになる。従って、被曝線量を精度よく実時間で常時モニターすることは必要不可欠であると言える。

宇宙放射線の特徴は、地表では自然には存在し得ない高エネルギーの陽子・重イオンとそれらに伴う2次粒子（中性子を含む）が主たる成分で、被曝線量は吸収線量と、LETの関数で表される線質係数の積で表される線量当量により評価されるのが通常である。

既存の宇宙放射線線量計測器としては、TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter)<sup>3)</sup> や RRMD-III (Real-time Radiation Monitoring Device-III)<sup>4)</sup>、DOSTEL (Dosimetric Telescope)<sup>5)</sup>が存在するが、これらの検出器の良さを兼ね揃えた、具体的には、RRMD-IIIの位置有感性、TEPCの生体等価性を持つ新しい線量計の開発に着手した<sup>6,7)</sup>。TEPCに位置有感性を付加したということで、Position Sensitive Tissue Equivalent Proportional Counter (PS-TEPC) と名付けている。

これまでに、有効体積が $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ の大型の検出器で重イオンの照射実験を行い、粒子のLETを測定できるという原理実証に成功している<sup>8,9)</sup>。今後は実用化に向けてTEPC程度の有効体積を持つ小型の検出器を開発することに主眼を置く。以下に現在の開発状況について述べる。

## 2. 実験装置と実験セットアップ

小型の検出器は、有効領域が $26 \times 26 \times 55 \text{ mm}^3$ の大きさで、位置検出部がMicro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC)で構成される。今回使用している $\mu$ -PICの構造図をFig.1に示す。厚さ $100 \mu\text{m}$ のポリイミド製の基板をベースとし、両面に陰極・陽極ストリップが $400 \mu\text{m}$ ピッチで両面間で互いに直交するように配列されている。実際には隣同士のストリップ2本を接続し $800 \mu\text{m}$ ピッチとしている。Fig.1右側の図の面のストリップは陰極ストリップで、直径 $50 \mu\text{m}$ 陽極ピクセルが基板を貫き陰極ストリップの円形の穴の中心に形成されている。このピクセルの近傍に高

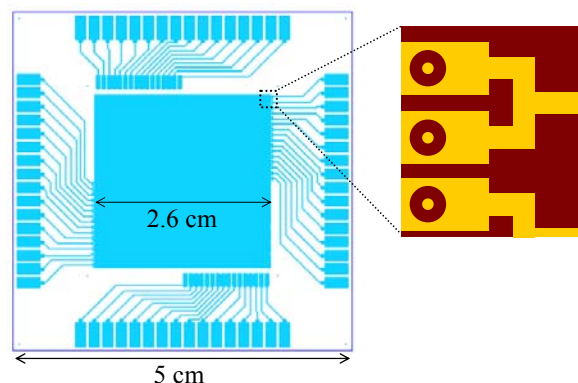


Fig. 1 Schematic view of  $\mu$ -PIC

電場を作ることで、ピクセル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 $800 \mu\text{m}$ ピッチの32チャンネルずつでxとyの2次元の位置情報得ることができ、検出器の有効体積内でのトータル付与エネルギーの情報を得ることができる。また、 $\mu$ -PICと平行平板を成す電極 (drift plane) とshaping ringsにより有効領域を決定し (Fig.2 参照)、放射線入射により生成された電離電子のドリフト方向の時間情報とドリフト速度からz軸上の位置情報を得る。以上より、Time Projection Chamber (TPC)として働かせることで、各粒子の3次元的な飛跡を観測し、検出器内での付与エネルギー  $E$ 、粒子のpath length  $R$ を測定しLET値 ( $= E/R$ )を得る。

使用したガスは、これまでに経験のあるArベースのガス (Ar: 90%、 $\text{C}_2\text{H}_6$ : 10%の混合ガス)と線量計測の際に使用する $\text{C}_3\text{H}_8$ ベースの生体組織等価ガス ( $\text{C}_3\text{H}_8$ : 55%、 $\text{CO}_2$ : 39.6%、 $\text{N}_2$ : 5.4%の混合ガス)である。生体組織等価ガスは、米NASAのTEPCで使用しているものと同じである。いずれのガスを使用する場合も現状で圧力を1 atmとしている。

エネルギー校正用として $^{241}\text{Am}$   $\alpha$ 線源をdrift planeの中央に線源が有効領域側に向くように設置している。

照射実験は、放射線医学総合研究所のHIMAC施設を利用し、使用したビーム核種とエネルギーはそれぞれ、 $^4\text{He}$ ・230 MeV/n、 $^{12}\text{C}$ ・400 MeV/n、 $^{28}\text{Si}$ ・800 MeV/n、 $^{56}\text{Fe}$ ・500 MeV/nの4種類である。

Fig.2に照射室内での検出器の配置図について示す。検出器の前後にはトリガー用のプラスチック・シンチレータを設置し、その同時信号をトリガー信号として使用している。線源からの $\alpha$ 粒子による信号を取得する際のトリガーは、セルフトリガーとした。検出器容器はアルミ製で壁の厚さは3 mmである。

$\mu$ -PIC自身の開発状況や他の応用については他の文献<sup>10-12)</sup>を参照されたい。

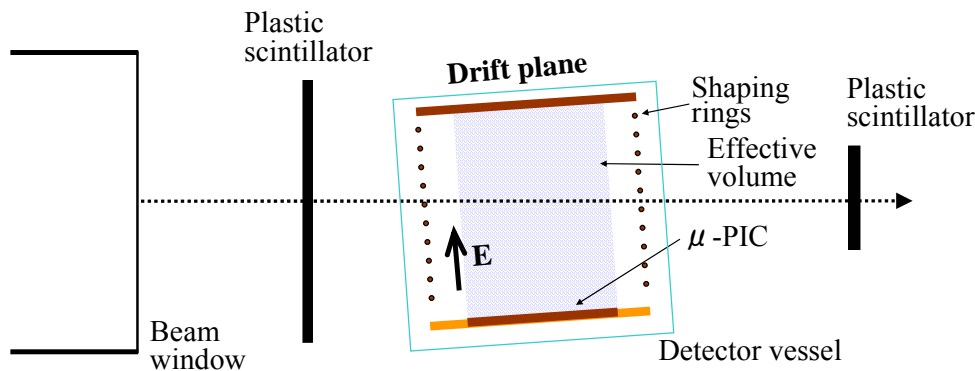


Fig. 2 Detector configuration for the irradiation experiment at HIMAC

### 3. 実験結果

結果の一例として、生体組織等価ガスを使用し、He を照射した際の粒子の 3 次元飛跡と付与エネルギー分布を Fig. 3, Fig. 4 にそれぞれ示す。前回の報告では、C、Si、Fe の 3 種類のビーム照射についての結果を示したが、小型の検出器で、より付与エ

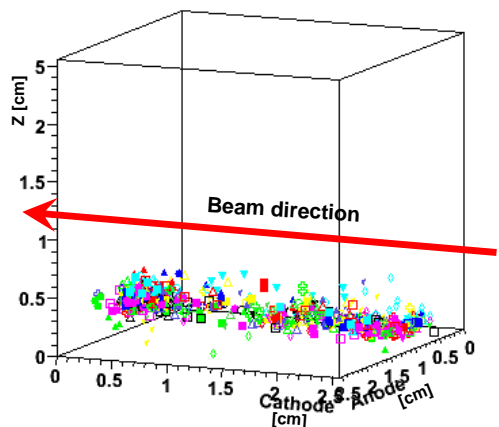


Fig.3 Reconstructed 3-dimensional tracks for helium particles

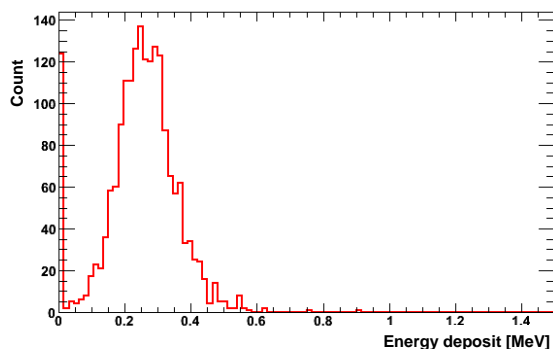


Fig.4 Distribution of energy deposited in the effective detection volume for helium particles

ネルギーの小さい He についても検出に成功した。また、Ar ベースガスを使用し、鉄ビームを照射した際に得られた検出器内での飛跡の長さ (Fig. 5) と付与エネルギー分布 (Fig. 6) についても示す。

検出器の付与エネルギー校正はこれらのビームによる応答を評価することで宇宙放射線線量計に必要なとされる広いエネルギー範囲にわたって行うことができる。

今回の実験では同一エネルギーの粒子を検出器の同じ場所に照射したため検出器内での粒子の飛跡の長さはほぼ同じであるので、LET 分布は付与エネルギー分布とほぼ同じ形になる。

### 4. まとめと今後の計画について

大型の検出器に引き続き、より宇宙放射線線量計としての実用性を意識した小型の検出器を用いて重イオン照射実験を実施し、重イオンの検出器中での 3 次元的な飛跡の観測、付与エネルギーと飛跡の長さの測定に成功した。今回の実験では、shaping rings として銅線を使用していたが、今後は、線量計としての生体等価性を高めるために生体組織等価プラスチック (A-150) で shaping rings を構成し、文字通りの PS-TEPC (TEPC をベースとした位置有感型検出器)を開発していく予定である。将来的には、ISS 等への搭載を目指す。最終的な検出器のデザインとしては、Fig.7 に示すように検出部とそれ以外の回路部を分け、サーベイメーターのように、検出部を独立させる構造にする予定である。

### 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 施設で実験を実施するにあたりまして、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。

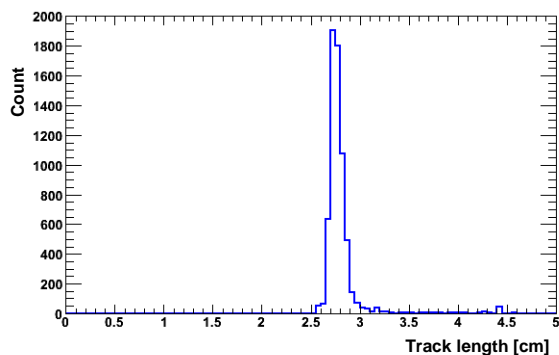


Fig.5 Measured track length in the effective detection volume for iron particles

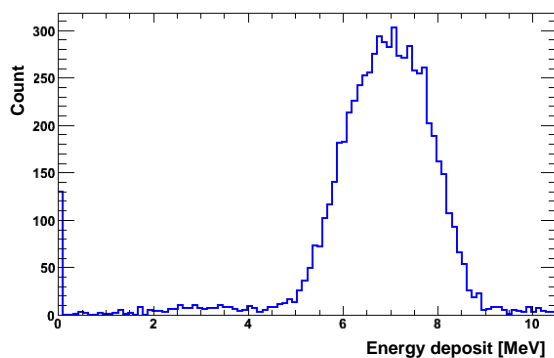


Fig.6 Distribution of energy deposited in the effective detection volume for iron particles

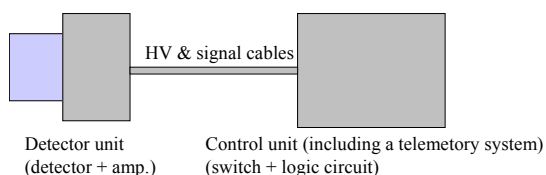


Fig. 7 Final design of PS-TEPC as a dosimeter

- 6) 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).
- 7) Terasawa, K. et al.; Space Dosimetry with a Tissue Equivalent Position Sensitive Proportional Counter, *Space Utilization Research*, **21**, 266 (2005).
- 8) Terasawa, K. et al.; Space Dosimetry with a Tissue Equivalent Position Sensitive Proportional Counter II, *Space Utilization Research*, **22**, 313 (2005).
- 9) Nagayoshi, T. et al.; Development of position-sensitive tissue equivalent proportional counter”, *Proceedings of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK*, 1 (2006).
- 10) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001).
- 11) Kubo, H. et al.; Development of a time projection chamber with micro-pixel electrodes, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A513**, 94 (2004).
- 12) Miuchi, K. et al.; Performance and applications of a  $\mu$ -TPC, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A535**, 236 (2004).

## 参考文献

- 1) Abe T. et al.; Radiation exposure limits for Japanese astronauts, *Mutat. Res.*, **430**, 177 (1999).
- 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) 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. Res.* **139**, 344 (1994).
- 4) 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).
- 5) Beaujean, R. et al.; Dosimetry inside MIR station using a silicon detector telescope (DOSTEL), *Radiat. Meas.*, **35**, 433 (2002).