

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 II

JAXA/早大 寺沢和洋、道家忠義
 早稲田大学 永吉勉、藤田康信
 京都大学 身内賢太郎、高田淳史、西村広展
 KEK 佐々木慎一、俵裕子
 JAXA 松本晴久、込山立人
 放医研 内堀幸夫

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

*Kazuhiro Terasawa^{1,2}, Tadayoshi Doke^{1,2}, Yasunobu Fujita², Tatsuto Komiyama¹, Haruhisa Matsumoto¹,
 Kentaro Miuchi³, Tsutomu Nagayoshi², Hironobu Nishimura³, Shinichi Sasaki⁴, Atsushi Takada³,
 Hiroko Tawara⁴ and Yukio Uchihori⁵*

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

E-Mail: terasawa.kazuhiro@jaxa.jp

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

³ Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

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

⁵ 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)”. This detector is expected to have good properties of existing dosimeters such as TEPC by NASA and Real-time Radiation Monitoring Device-III (RRMD-III) based on Si telescopes. A novel technique named “Micro Pixel Chamber” (μ -PIC) makes it feasible. Heavy ions irradiation experiments were performed in HIMAC using the detector with the sensitive volume of $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. The energy distributions measured by the detector were consistent with the theoretical calculation.

Key words; Space Dosimetry, Dose Equivalent, PS-TEPC, μ -PIC

1. はじめに

宇宙で活動する宇宙飛行士は必然的に宇宙放射線により被曝を受けることになるが、被曝の大半は地表には存在しない、高エネルギーの陽子・重イオンからもたらされる。その線量率は地表における自然被曝より2オーダーも高いため、地表における職業人に与えられている線量限度を適用することは短期間の宇宙滞在を除き困難となっている。そこで、宇宙飛行士に対しては、放射線被曝によって生じる致死性の癌で死ぬ確率が3%となる値が与えられており、宇宙へ進出する者にそれなりの覚悟を迫ることとなっている¹⁾。従って、今後、月面での居住や火星への有人飛行の際には、長期にわたる宇宙滞在が想定されるため、宇宙飛行士の健康管理上、精度の高い線量計測が必要不可欠となる。

既存の宇宙放射線線量計測器としては、アメリカ

NASAが標準検出器として採用しているガス比例計数管 (Tissue Equivalent Proportional Counter, TEPC)²⁾ やシリコン検出器望遠鏡 (Real-time Radiation Monitoring Device-III, RRMD-III と Dosimetric Telescope, DOSTEL)^{3,4)} が存在するが、ガス比例計数管の場合には、最小電離粒子の検出ができない、LETの近似を用いているため測定精度がよくない等の欠点があり、また、シリコン検出器望遠鏡の場合には、生体等価物質で検出器全体が構成されていない、全方向に対して感度がない等の欠点が存在する¹⁾。そこで、この両方の検出器の良さを兼ね揃えた新しい線量計の開発に踏み切った⁶⁾。原理的には、生体等価物質で構成された位置有感型比例

¹⁾ シリコン検出器を立方体型に組み合わせたタイプの望遠鏡では全方向に感度がある⁵⁾。

計数管で実現可能となる。具体的な検出器の候補の一つとして、近年、京都大学を中心とするグループで開発された、Micro-Pixel Chamber (μ -PIC)がそれに相当する⁷⁾。これまでの μ -PICの応用例の中では、電子、陽子、最小電離粒子等の検出が主であり、重イオンの検出を行う実験はこれまでにまだしっかり行われていない。

宇宙放射線による被曝線量は線量当量によって評価され、線量当量は吸収線量と線質係数の積で与えられる。その際、線質係数は LET の連続関数として定義されるので、宇宙放射線線量計測には、粒子毎の LET を測定することが必須である。従って、そのための計測器の開発の際には、検出器が粒子毎に正しい LET を与えるかが最初の原理的なポイントとなる。従って、今回は実験的にそのことを実証すべく、 μ -PIC を用いて初めての重イオン照射実験を行ったのでそれについて主に報告する。

2. 実験装置と実験セットアップ

検出器は、有効領域が $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ の大きさで、位置検出部が μ -PICで構成される。 μ -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に、両面に陰極・陽極ストリップが $400 \mu\text{m}$ 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 $50 \mu\text{m}$ 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256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からz軸の位置情報を得る。以上より、Time Projection Chamber (TPC)として働き、各粒子の3次元的な飛跡を観測することができる。

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%、 C_2H_6 : 10%の混合ガス) と線量計測の際に使用する C_3H_8 ベースの生体等価ガス (C_3H_8 : 55%、 CO_2 : 39.6%、 N_2 : 5.4%の混合ガス) で

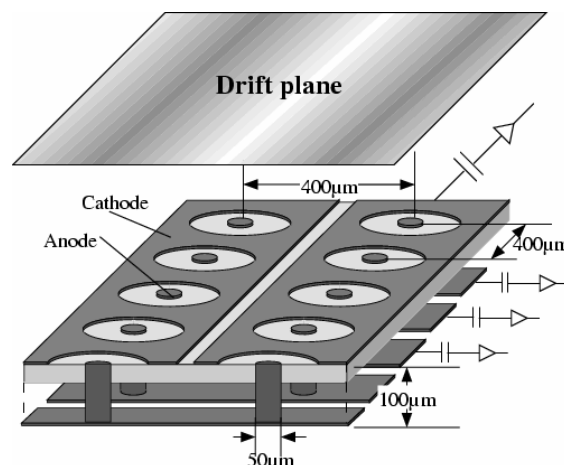


Fig. 1 Schematic view of μ -PIC

ある。生体等価ガスは、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、圧力を 1 atm としている。

検出器内にはエネルギー校正用に ^{241}Am α 線源を Fig. 1 の drift plane の中央に線源が有効領域側に向くように設置した。

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、 $^{12}\text{C} \cdot 400 \text{ MeV/n}$ 、 $^{28}\text{Si} \cdot 800 \text{ MeV/n}$ 、 $^{56}\text{Fe} \cdot 500 \text{ MeV/n}$ の3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・シンチレーターを設置し、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 α 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。データ読み出し系の詳細については、文献 8 を参照されたい。

3. 実験結果

ガスとして Ar ベースのガスを使用し、Si ビームを入射させた際に得られた3次元飛跡を Fig. 3 に示す。100 イベント分の飛跡をまとめて表示しており、

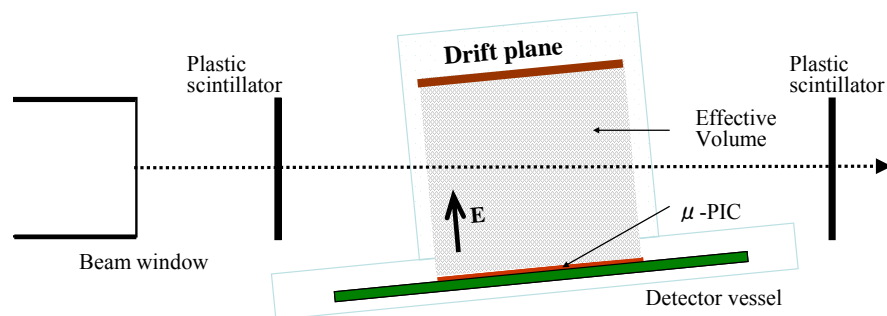


Fig. 2 Detector arrangement for the irradiation experiment at HIMAC

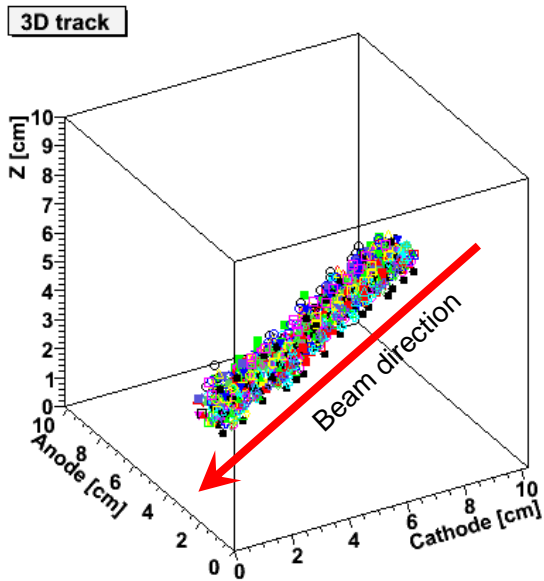


Fig.3 Reconstructed 3-dimensional tracks for silicon particles

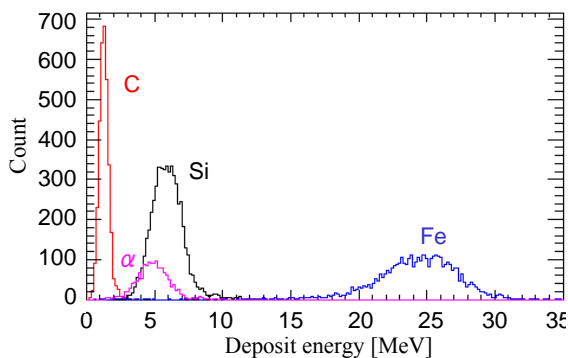


Fig.4 Distributions of energy deposited in the effective detection volume

ビームプロファイル (約 10 mm φ) をよく再現している。

続いて、同様に Ar ベースガスを使用した場合のエネルギー分布を Fig.4 に示す。この分布が与える平均の付与エネルギーは、ビームの核種とエネルギー、検出器に入射するまでの物質を考慮した阻止能の計算とほぼ一致した結果を得ることができた。また、生体等価ガスでも同様の飛跡、エネルギー分布を得ている。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の粒子のパスの長さは同じであるので、付与エネルギー分布も LET 分布も同じ形になるので、理論値との比較にはそのままエネルギー分布を使用している。

4. まとめと検出器のデザインについて

重イオン照射実験を通して、 μ -PIC を使用した検出器が、炭素、シリコン、鉄といった重イオンの LET をイベント毎に評価できることが実験的に示されたことで、宇宙放射線線量計測器を開発する上での第一段階はクリアされたと言える。

今回の実験では、京都大学で既に保有しているシステムということで、有効領域の大きさが $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ の検出器を使用した。線量計測という意味合いではこのような大きさを必要とせず、宇宙船等への搭載性を考慮する意味でも小型の検出器が現実的である。具体的には、既存のTEPCに位置検出機能を付加したものを想定している。Fig.5 に試作した小型 μ -PICの形状を示す。図中の中央の $26 \times 26 \text{ mm}^2$ の領域がこの μ -PICの有効な部分である。今回の実験で使用したものと同様に $400 \mu\text{m}$ ピッチのストリップを使用しているが、隣り合うストリップ 2 本で一つの読み出しとしている。宇宙放射線線量計測という意味では、 $\sim 1 \text{ mm}$ 程度の位置分解能で十分で、RRMD-IIIの位置分解能と同程度にしている。一辺が 26 mm で片側 32ch の読み出し、有効領域を $26 \times 26 \times 26 \text{ mm}^3$ とし、伝導性の生体等価プラスチックで囲み、生体等価ガスを使用することで線量計測器として機能させる。

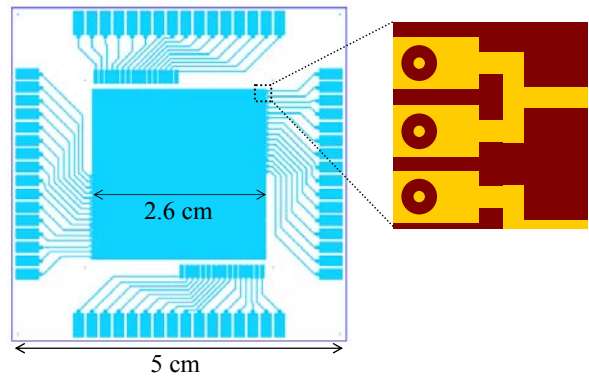


Fig.5 Picture of a small μ -PIC for PS-TEPC

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、ビーム実験の際に多大なご協力をいただきました、京都大学の谷森達先生、窪秀利先生、関谷洋之先生、服部香里さんに感謝申し上げます。

参照文献

- 1) Abe T. et al.; Radiation exposure limits for Japanese astronauts, *Mutat. Res.*, **430**, 177 (1999).
- 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. Res.* 139, 344 (1994).
- 3) Beaujean, R. et al.; Dosimetry inside MIR station using a silicon detector telescope (DOSTEL), *Radiat. Meas.*, 35, 433 (2002).
- 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) Yoshihira, E. et al.; Omni-directional silicon detector telescope for measurement of LET distribution in space, *Technical Report*, RISE, Waseda Univ., No.2000-21 (2000).
- 6) Terasawa, K. et al.; Space Dosimetry with a Tissue Equivalent Position Sensitive Proportional Counter, *Space Utilization Research*, 21, 266 (2005).
- 7) Ochi, A. et al.; A new design of the gaseous imaging detector: Micro Pixel Chamber, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A471**, 264 (2001).
- 8) Kubo, H. et al.; Development of a time projection chamber with micro-pixel electrodes, *Nucl. Instr. and Meths.*, **A513**, 94 (2004).