

受動積算型線量計 PADLES による  
低地球軌道における宇宙放射線計測

永松 愛子

総合研究大学院大学

高エネルギー加速器科学研究科

加速器科学専攻

2008 年 9 月

第1章	序論	1
第2章	PADLES線量計に関する物理量の定義	4
2.1	吸収線量(率)	4
2.2	線エネルギー付与	4
2.3	線質係数	4
2.4	線量当量(率)	5
2.5	平均の線質係数	5
第3章	LEO宇宙放射線環境	6
3.1	銀河宇宙線	7
3.2	太陽粒子線	8
3.3	地球磁場捉粒子	10
3.4	二次粒子	10
3.5	中性子	10
3.6	線量に影響する環境要因	11
3.6.1	地球磁場捉陽子の高度依存性	11
3.6.2	方位角依存性	11
3.6.3	軌道傾斜角依存性	12
3.6.3.1	極域と赤道域	12
3.6.3.2	南大西洋異常	12
3.6.4	観測点周囲の遮蔽状況	12
第4章	LEOでの被ばく線量限度	14
第5章	LEO宇宙放射線測定機器に要求される仕様	15
第6章	各国の宇宙放射線計測の現状	17
6.1	NASAの宇宙放射線計測	18
6.2	RSA/IBMPの宇宙放射線計測	19
6.3	欧州の宇宙放射線計測	19
6.4	日本の宇宙放射線計測	21
第7章	PADLES線量計素子とパッケージ	22
7.1	PADLES線量計素子	22
7.2	PADLESパッケージ	23
第8章	PADLES線量計算方法	25
8.1	TLD-MSO-Sが実測する水等価吸収線量	25
8.2	ハーツラスTD-1プラスチック飛跡検出器を用いた高LET成分のLET分布の評価	26
8.3	LET分布から得られる吸収線量及び線量当量	29
8.4	全吸収線量、全線量当量と平均線質係数	30

第9章	PADLES線量計素子に対する地上実験.....	31
9.1	TLD-MSO-S素子のアニーリングと熱蛍光量読み出し.....	31
9.2	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の解析.....	31
9.2.1	化学エッチング.....	31
9.2.2	エッチピット画像取得.....	32
9.2.3	粒子フルエンス検出面の定義とエッチピットの選択方法.....	33
9.3	地上照射実験.....	35
9.3.1	TLD-MSO-S素子による地上自然放射線の測定実験.....	35
9.3.2	TLD-MSO-S素子に対するガンマ線照射実験.....	35
9.3.3	陽子線及び重イオン・ビーム照射実験.....	36
9.3.3.1	TLD-MSO-S素子の陽子線に対する線量応答実験.....	39
9.3.3.2	TLD-MSO-S素子の重イオンに対する線量応答実験.....	39
9.3.3.3	TLD-MSO-S素子の長期フェーディング特性実験.....	40
9.3.3.4	TLD-MSO-S素子の照射直後の熱蛍光特性測定実験.....	42
9.3.3.5	TLD-MSO-S素子のLET特性実験.....	42
9.3.3.6	TLD-MSO-S素子に対する陽子線入射角度依存性実験.....	42
9.3.3.7	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の校正実験.....	42
9.3.3.8	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器のフェーディング特性実験.....	43
9.3.3.9	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器のエージング特性実験.....	44
9.3.3.10	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡生成感度の湿度影響実験と包装材の検討.....	44
9.3.3.11	アルミ・シール・バックに密封したPADLES線量計の感度試験.....	45
9.4	地上照射実験の測定結果と考察.....	45
9.4.1	TLD-MSO-S素子の地上自然放射線に対する測定.....	45
9.4.2	TLD-MSO-S素子のガンマ線に対する応答.....	46
9.4.3	TLD-MSO-S素子の陽子線に対する線量応答.....	48
9.4.4	TLD-MSO-S素子の重イオン線に対する線量応答.....	48
9.4.5	TLD-MSO-S素子の長期フェーディング特性.....	50
9.4.6	TLD-MSO-S素子の照射直後の熱蛍光特性.....	53
9.4.7	TLD-MSO-S素子のLET特性.....	53
9.4.8	TLD-MSO-S素子に対する陽子線入射角度依存性.....	55
9.4.9	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の校正曲線.....	56
9.4.10	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の飛跡生成感度の入射伏角依存性.....	56
9.4.11	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器のフェーディング特性.....	58
9.4.12	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器のエージング特性.....	61
9.4.13	ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の湿度に対する影響.....	62
9.4.14	アルミ・シール・バックに密封したPADLES線量計の応答.....	64
第10章	PADLES線量計測用ソフトウェアの開発.....	65

10.1 概要 .....	65
10.2 TLD PADLES .....	65
10.3 AUTO PADLES .....	65
10.3.1 フライト情報データ管理機能 .....	67
10.3.2 CR-39 エッチピット解析機能 .....	67
10.3.3 線量計算機能 .....	69
第11章 PADLES線量計測定精度の評価 .....	71
11.1 宇宙放射線検出器・国際比較実験ICCHIBAN project .....	71
11.2 PADLES線量計の測定精度に影響する要因 .....	75
第12章 PADLES線量計を用いたISSにおける宇宙放射線計測 .....	77
12.1 HTDV・CCD放射線損傷実験 .....	77
12.1.1 実験概要 .....	77
12.1.2 CCDホルダー .....	78
12.1.3 ハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の飛跡生成感度の確認 .....	80
12.1.4 HZE粒子と白傷との相関 .....	81
12.1.5 線量計測 .....	85
12.1.6 白傷発生率と線量の相関 .....	87
12.2 マトリョーシカ・ファントム船外曝露実験 .....	87
12.2.1 実験概要 .....	87
12.2.2 マトリョーシカ・ファントム .....	88
12.2.3 PADLES線量計 .....	89
12.2.4 線量計素子感度に与える搭載温度の影響を確認する地上模擬実験 .....	90
12.2.5 船外曝露部実験 .....	97
12.3 アルトクリス遮へい効果実験 .....	99
12.3.1 実験概要 .....	99
12.3.2 Phase1 実験 .....	101
12.3.3 Phase2 実験 .....	105
12.3.4 Phase1 及び Phase2 実験のまとめ .....	108
第13章 今後の展望と課題 .....	109
13.1 PADLES線量計を使った日本の実験モジュール「きぼう」での放射線計測実験 .....	109
13.1.1 AreaPADLESによるエリア・モニタリング .....	109
13.1.2 BioPADLESによる生物試料被ばく線量測定 .....	110
13.1.3 CrewPADLESによる宇宙飛行士の個人被ばく線量計測 .....	110
13.1.4 DosimetricPADLESによる国際協力実験 .....	111
13.1.5 ExpPADLESによる技術開発実験 .....	111
13.2 今後の展開: PADLES線量計を使った月面有人活動に向けた取り組み .....	111
第14章 まとめ .....	113

謝 辭.....	114
引用文献.....	115
研究業績.....	122

## 第1章 序論

国際宇宙ステーション (International Space Station: ISS) では、種々のライフサイエンス宇宙実験が実施される。これらの目的の一つは、搭乗員が長期にわたって宇宙に滞在するためのリスク評価や生物試料に対する宇宙放射線影響を定量的に解明することにある。宇宙放射線の存在は、無重力や高真空等と並んで、地上と比べた場合の宇宙環境の特異性を代表する重要な要素である。そのため、有人宇宙開発において、宇宙放射線に対する被ばく線量計測は最も重要な技術のひとつとなっている。

宇宙放射線計測によって得られた成果は、実測データに基づく宇宙放射線解析モデルの改良・精度向上、宇宙放射線に対する遮蔽の機能を持つ宇宙航空機や居住モジュールのための設計・構築技術の向上、放射線被ばくをできるだけ抑えることができる遮蔽材料や次世代型宇宙服の開発等、多くの研究開発の基礎となる。

民間人の ISS への搭乗や微小重力体験飛行等、人類の宇宙滞在のニーズはますます高まっており、将来の月・火星探査にともなう宇宙長期滞在に向けても、宇宙放射線計測は宇宙・航空安全技術の基盤となる技術である。

また、宇宙飛行士のフライト当たりの滞在日数や生涯搭乗日数は被ばく線量制限値 (4.1 節参照) で制限されるため、宇宙放射線計測には高い精度が必要である。さらに、宇宙飛行士が長期に渡って宇宙に滞在する場合のリスク評価や飛行計画策定のためにも、精度の高い被ばく線量測定データの蓄積が求められている。

宇宙放射線場では、陽子から鉄核までの種々の線質の異なる重荷電粒子が被ばくの主要な原因となる。これら重荷電粒子のエネルギー範囲の上限は $\sim 10^9 \text{ GeV/n}$ を超える。また、これらの重荷電粒子の線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) 分布は  $0.2 \text{ keV}/\mu\text{m}$  から  $1000 \text{ keV}/\mu\text{m}$  以上の広範囲にわたる。このような広い LET 分布を持つ放射線混合場における生物の被ばく効果を調べるためには、吸収線量の測定だけでは不十分である。なぜなら、数  $\text{keV}/\mu\text{m}$  ～ 数百  $\text{keV}/\mu\text{m}$  の高 LET 領域では、吸収線量当たりの生物学的効果 (例えば発ガン等) が低 LET 領域よりも大きく発現するからである。従って、宇宙飛行士の被ばく線量や生物学的効果を念頭に置いた宇宙放射線計測では、宇宙放射線の「LET 分布測定」とそれを考慮した「線量計測」が必須となる。

熱蛍光線量計 (thermoluminescence dosimeter: TLD) は、非常に古くから宇宙放射線計測に用いられてきた線量計である。しかし、TLD は、低 LET 放射線には高い感度を持つが、高 LET 放射線には感度が低くなるという欠点があるので、高 LET 成分を含む宇宙放射線場を TLD のみで測定した吸収線量は過小評価となる。

TLD とは対照的に、CR-39 プラスチック飛跡検出器は、高 LET 重荷電粒子 (約  $4 \text{ keV}/\mu\text{m}$  以上) に対して飛跡生成感度を持つ。既知の LET の重荷電粒子を用いて得られた校正曲線 (飛跡生成感度と LET の関係) を用いれば、個々の重荷電粒子の飛跡生成感度から LET を算出することができる。従って、宇宙生物実験や宇宙飛行士の被ばく管理のために宇宙放射線計測で必要とされる高 LET 成分の微分 LET 分布が測定できる。しかし、最近まで、CR-39 プラスチック飛跡検出器は LET 分布の測定には用いられてきたが、線量計測への応用はなされていなかった。

CR-39 プラスチック飛跡検出器とTLDの特長を組み合わせることにより、宇宙放射線の全LET領域に対する吸収線量、線量当量、平均の線質計数を測定する手法が 1995 年、早稲田大学の道家達によって最初に提案された[1]。

CR-39プラスチック飛跡検出器は、宇宙放射線の高LET成分の線量計測を行える原理的に優れた組織等価検出器であるが、これまで解析に大変な労力と時間が必要であった。従って、CR-39プラスチック飛跡検出器を用いて線量計測等を行った生物実験では、フライト直後に生物試料から得られる実験結果と、線量測定結果との相関を迅速にとりにくいことが指摘されてきた。また、CR-39プラスチック飛跡検出器の解析装置が高価であるため、大学の一研究室レベルで解析を行うには負担が大きすぎる欠点があった。そのことから、JAXAにおいて継続的で効率的なCR-39プラスチック飛跡検出器の自動解析技術を開発し、宇宙放射線量の迅速な解析を行うことが望まれていた[2]。さらに、CR-39プラスチック飛跡検出器については、個々の生物試料に対する宇宙放射線飛跡トラッキングを効率的に行う技術、宇宙放射線曝露雰囲気(温度、酸素分圧、湿度等)を考慮したパッケージングの開発、短飛程高LETの二次粒子線による線量への寄与の検討、検出効率を推定する上で重要なパラメータである飛跡生成感度の入射角依存性について十分な研究が進んでいない等、多くの課題が残されていた。また、TLDの重荷電粒子に対する応答やその長期フェーディング特性、照射時や保存時の温度依存性に対する研究はこれまであまり進んでいなかった。

そこでこれらの課題を念頭に置き、宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) 宇宙環境利用センターでは、高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター、早稲田大学 理工学総合研究所、放射線医学総合研究所との共同研究の下、この二種類の受動型線量計TLDとCR-39 プラスチック飛跡検出器を組み合わせる線量計測原理を採用した受動・積算型宇宙放射線計測システム(Passive Dosimeter for Life Science Experiments in Space: PADLES)の実用化をめざした技術開発と、ISSへの搭載化を進めてきた。

本研究では、PADLES 線量計を用いて、線質の異なる重荷電粒子線が混合する放射線場、すなわち広い LET 領域に渡る宇宙放射線に対する線量測定手法を、TLD と CR-39 の重荷電粒子に対する実験データに基づいて確立した。また、PADLES 線量計が地上に帰還した後に、迅速に線量計測結果を得られるように、PADLES 線量計の解析システムを開発・整備した。本研究の結果、PADLES 線量計測技術が確立され、PADLES 線量計とその解析システムによる、ISS での継続的な宇宙放射線計測が可能となった。

開発したPADLES線量計は2.5cm角厚さ5mm程度と小型で電源を必要としないので、生物試料のごく近傍に設置が可能であり、人体への装着も容易である。また、CR-39 プラスチック飛跡検出器とTLDを組み合わせた線量計は、LET分布の測定が可能な宇宙環境用受動積算型線量計としては、現在最も信頼性が高いと考えられている[3][4][5][6]。

本論文の第2章では、PADLES 線量計の線量計測に関わる物理量の定義について述べる。

第3章では、PADLES 線量計の測定対象である低地球軌道での宇宙放射線環境の特徴について述べる。

第4章では、低地球軌道での被ばくと ISS 日本人宇宙飛行士の被ばく線量限度について述べる。

第 5 章では、低地球軌道で宇宙放射線計測を行う機器に要求される仕様について述べる。

第 6 章では、NASA,RSA/IBMP、欧州及び日本の宇宙放射線計測の現状について述べる。

第 7 章では、PADLES 線量計で使用する TLD-MSO-S と酸化防止剤入りの CR-39 プラスチック固体飛跡検出器(ハーツラスTD-1)の特徴とパッケージの仕様について述べる。

第 8 章では TLD-MSO-S 素子が実測する水等価吸収線量、CR-39 プラスチック固体飛跡検出器が測定する宇宙放射線中の高 LET 成分の LET 分布測定とそれから算出される水等価吸収線量と線量当量、及び TLD-MSO-S と CR-39 のデータを組み合わせて全 LET 領域の吸収線量と線量当量を計算する方法について述べる。

第 9 章では、PADLES 線量計を実用化するために行われた地上照射実験について述べる。本地上照射実験で得られたデータや知見は、第 7 章でのべる PADLES 線量計の精度向上やパッケージング仕様に生かされ、また、第 8 章で述べる線量計算に使用する校正定数や補正方法等を決定するために使用された。

第 10 章では、PADLES 線量計を迅速にかつ長期にわたって実際に ISS で運用していくために開発されたソフトウェアについて述べる。

第 11 章では、PADLES 線量計の測定精度評価について述べる。

第 12 章では、実際に PADLES 線量計を応用した ISS における宇宙実験、HTDV-CCD の放射線損傷実験、マトリョーシカ・ファントム実験及びアルトクリス遮蔽実験とその結果について述べる。

第 13 章では、今後の展望と課題について述べる。現在、日本の実験モジュール「きぼう」の打ち上げと ISS への設置が行われており、今後約 10 年間の運用が開始された。本研究の成果に基づいて確立した PADLES 線量計と、その解析システムを用いて以下の宇宙放射線計測実験が実施される: 日本実験棟モジュール内のエリア・モニタリング (AreaPADLES)、ライフサイエンス実験への応用 (BioPADLES)、日本人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測への応用 (CrewPADLES)、ISS パートナーと実施する国際協同実験 (DosimetricPADLES) 及び JAXA が実施する技術開発実験 (ExpPADLES)。

第 14 章では本研究のまとめを述べる。



## 第2章 PADLES 線量計に関する物理量の定義

PADLES 線量計測に関連する物理量の定義を以下に述べる。

### 2.1 吸収線量(率)

質量  $dm$ [kg]の物質に電離放射線により付与されたエネルギーの平均値が  $d\varepsilon$ [J]であるとき、吸収線量  $D$ は以下のように定義される。

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2-1)$$

単位はグレイ[Gy = J/kg]である。吸収線量率は単位時間あたりの吸収線量を表す。

宇宙放射線計測では、線量を評価する代表物質として生体物質の主成分である水が使用される。従って、PADLES 線量計では、水等価の吸収線量を測定する。

### 2.2 線エネルギー付与

線エネルギー付与(Linear Energy Transfer: LET、 $L$ )は、荷電粒子の飛跡に沿って単位長さ当たりに物質が付与される平均のエネルギーとして定義される。LETは、荷電粒子の電荷、質量と速度、及び物質の種類や密度に依存する。1MeVの荷電粒子に対する水中のLETを単位[keV/ $\mu$ m]で比べると、電子  $2 \times 10^{-3}$ 、陽子 20、アルファ線 200、炭素イオン 500 程度である。

宇宙放射線場では、線質の異なる電子や重荷電粒子、中性子線等の一次及び二次放射線が混合している。そのため、PADLES線量計では、一次及び二次放射線の内、10[keV/ $\mu$ m]以上の重荷電粒子に対して、水中の限定されない線エネルギー付与 $LET_w$ [keV/ $\mu$ m $\cdot$ water]を測定し、2.4 節に述べる線量当量を評価する。

本論文では、CR-39プラスチック飛跡検出器で測定される高LET領域の重荷電粒子の分布の特徴を考察し、また、線量当量を算出するために、LET 分布を取り扱う。LET 分布とは、重荷電粒子のフルエンス(率)をLET の関数で表したものである。

### 2.3 線質係数

国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)は、放射線場のLET分布から線量当量 $H$ を算出できるように、ICRP26[7]で、線質係数 $Q$ を $LET_w$ [keV/ $\mu$ m $\cdot$ water]の関数として与えた。この関数は、ICRPの1990年勧告(ICRP60)[8]で以下のように見直された。図2-1にICRP26及びICRP60の $Q-L$ 関係を示す。

$$\begin{aligned} Q(L) &= 1 & L \leq 10, \\ &= 0.32L - 2.2 & 10 < L \leq 100, \\ &= 300L - 0.5 & L > 100. \end{aligned} \quad (2-2)$$

本論文ではICRP60の $Q-L$ 関係を用いて線量当量を算出する。宇宙環境での放射線量の計測は、放射線防護の観点から少なくとも安全側に線量を評価できなければならない。ICRP60では改

訂した  $Q-L$  関係を用いて評価した「実用量」である線量当量が「防護量」である等価線量を過小評価しないだろうとしている。ICRP60 では、人体や生物試料への生物学的効果比(Relative Biological Effectiveness: RBE)が高くなる  $10\sim 100\text{keV}/\mu\text{m}$  の領域の線質が高く設定されているのが特徴である。宇宙放射線計測には、宇宙放射線の高 LET 領域のフラックスが高い  $10\sim 100\text{keV}/\mu\text{m}$  の線質が考慮されている ICRP60 の線質係数  $Q(L)$  を用いることが妥当であるとして、現在、宇宙放射線計測を行っている宇宙関連機関や研究グループは ICRP60 の  $Q-L$  関係を用いて線量当量を算出している。

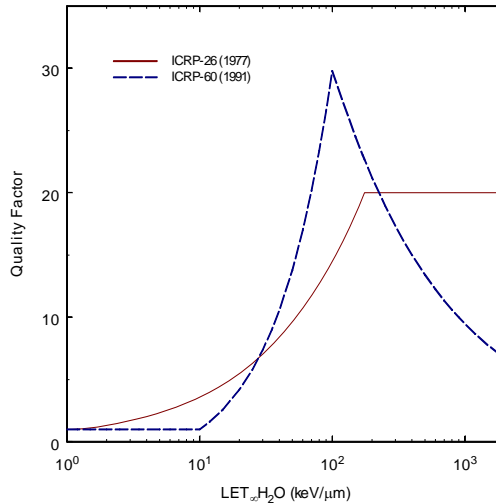


図 2-1 ICRP26 およびICRP60 で導入された線質係数と $\text{LET}_{\text{H}_2\text{O}}$ の関係[7][8]。

## 2.4 線量当量(率)

一般に、ある吸収線量に対する生物学的効果は、放射線の線質やその他の条件に依存する。従って、吸収線量のみで放射線生物影響を評価することはできない。そのため、通常被ばくレベルの放射線防護の観点から、ある器官に対する放射線効果を表すための実測可能な線量として線量当量  $H$  が使用される。 $H$  は、吸収線量  $D$ 、線質係数  $Q(L)$  及び修飾因子  $N$  の積として定義される。修飾因子は線量率等照射条件による相違を考慮するための係数で通常は 1 である。宇宙放射線計測においても  $N=1$  とおく。従って、ある LET を持つ放射線に対して線量当量は次式で表される。

$$H(L) = D(L)Q(L). \quad (2-3)$$

$H$  の単位はシーベルト[Sv]である。線量当量率は単位時間あたりの線量当量を表す。

## 2.5 平均の線質係数

宇宙放射場の、平均の線質係数は、吸収線量に対する線量当量の比として与えられる。

$$Q_{\text{AVE}} = H/D. \quad (2-4)$$

### 第3章 LEO 宇宙放射線環境

ISS やスペース・シャトルは、低地球軌道 (Low Earth Orbit: LEO) と呼ばれる地上から高度 300 ~ 500km を周回する。LEO における一次宇宙放射線はその起源や形態により、銀河宇宙線、太陽粒子線、地球磁場捉粒子線の 3 種類に分類される。LEO の宇宙放射線環境は、これら 3 種類の一次宇宙線が飛び交う複合的な放射線環境である (図 3-1 参照)。また、地球大気によるアルベド粒子も存在する。

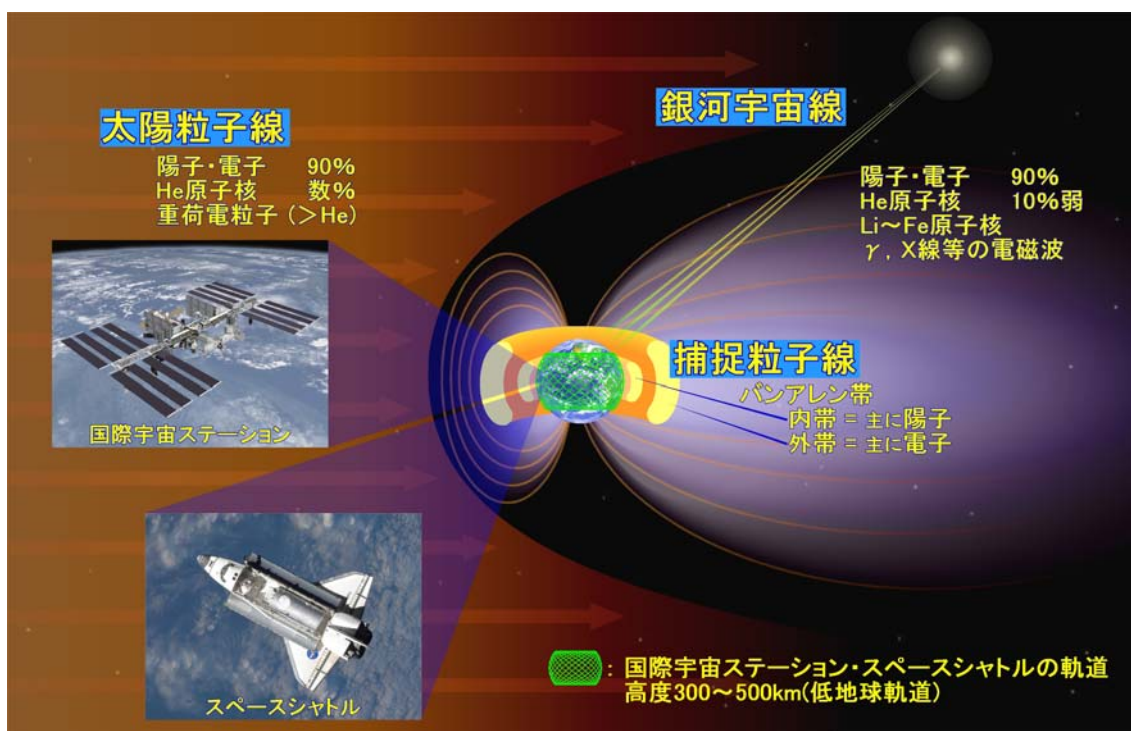


図 3-1 LEO の宇宙放射線環境。緑色の斜線帯がスペース・シャトルや ISS の軌道高度である。

地上の自然放射線環境と宇宙放射線環境の比較を表 3-1 に示す。地上の自然放射線環境に比べ宇宙放射線環境は以下の特徴を持つ。

- ① RBE の高い、高 LET 放射線を多く含む、
- ② 地上に比べて線量率が 2 桁ほど大きい、
- ③ 微小重力下で被ばくする、
- ④ 放射線の角度分布が等方的に近い。

銀河宇宙線、太陽粒子線、地球磁場捉粒子線の粒子フラックスやエネルギー・電荷分布は、地球磁場の変動や太陽活動等多くのパラメータに複雑に依存して変化する。また、LEO では、一次宇宙線の強度が飛行する高度や軌道傾斜角、経度、緯度等で変化するため、1 周約 90 分の地球周回軌道をとる ISS 船内の放射線環境も時間的に大きく変動することになる。LEO において、低軌道傾斜角のみを取る飛行体であれば、地磁気防護により、捕捉粒子線と高エネルギー銀河宇宙線による

被ばくが中心となるが、ISSは軌道傾斜角が51.6度と大きいため、上記の3つの線源のすべてによる被ばくがある。粒子のフルエンスで見ると陽子が主であり、太陽活動によってその増減がある。また船内では船壁等との衝突により生じる二次粒子、特に中性子の被ばくも問題になる。また二次粒子は人体との相互作用でも生じる。

表 3-1 宇宙 (LEO) と地上の自然放射線環境 (外部被ばく) の比較。

	地上	宇宙 (LEO)
線源	天然放射性同位元素 二次宇宙線	一次宇宙線 (太陽粒子線、銀河宇宙線、地球磁場捉陽子線) 二次宇宙線 (陽子線、重荷電粒子線、中性子線等)
放射線	γ線、ミュオン、中性子線等 (γ線のエネルギーは MeV 程度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子、陽子から鉄核までの重荷電粒子、中性子</li> <li>エネルギー範囲の上限は<math>\sim 10^9</math> GeV/nを超える</li> <li>被ばく線量に寄与する LET 分布は <math>0.2\text{keV}/\mu\text{m} \sim 1000\text{keV}/\mu\text{m}</math> 以上の広範囲にわたる</li> </ul>
線質	線質係数 γ線:1 中性子線:5~20	線質係数 1~30
線量率	地上のバックグラウンド線量 $1.5\mu\text{Gy}/\text{day}$ <sup>注1)</sup> , $2.1\mu\text{Sv}/\text{day}$ <sup>注2)</sup>	$150 \sim 300\mu\text{Gy}/\text{day}$ , $300 \sim 600\mu\text{Sv}/\text{day}$ <sup>注3)</sup>

注 1) TLD-MSO-S 素子による JAXA 実験室内での測定結果。

注 2) 1988 年国連科学委員会 (UNSCEAR) 報告。

注 3) 過去の ISS 米国モジュールの船内測定結果。

### 3.1 銀河宇宙線

太陽系外から飛来する銀河宇宙線は、太陽系において数 MeV/n から  $10^9$  GeV/n 以上の広いエネルギー分布を持ち、そのピークは 1 GeV/n 付近にある。ISS 軌道におけるフラックスの約 98% は陽子以上の重荷電粒子、残りの約 2% が電子と陽電子である。銀河宇宙線に起因する二次放射線には、地球大気と銀河宇宙線の相互作用で作られるアルベド中性子・陽子も存在するが、成分が少なくエネルギーも低いので線量計測ではそれほど重要ではない。

銀河宇宙線のほとんどは陽子 (87%) と He (12%) であり [9]、残り 1% 程度が Li 以上の原子番号が大きくエネルギーの高い重荷電粒子 (High-Z and high-Energy particles: HZE 粒子) である。

特に存在比の高い鉄イオンは、LET が高く放射線生物影響を与えやすい。宇宙環境での生物学的影響研究では、線質として大きな RBE を持つ重荷電粒子成分による被ばくと無重力との相関が注目されている。

主に 1 GeV/n 以下の銀河宇宙線のフラックスは約 11 年周期の太陽活動の変動にともなって変化する。太陽活動が活発な時には太陽風により銀河放射線が弾き飛ばれるため、LEO での銀河宇宙線のフラックスは、太陽活動が極小の時期に最大に、太陽活動が極大の時期に最小になる [10]。

銀河宇宙線はまた地球磁場によっても影響を受け、地磁気線が地表に向かう北極や南極地方では銀河宇宙線粒子が低高度まで流れ込む。従って、LEO では両極域で銀河宇宙線による被ばく量が増え赤道付近で最小となる。

### 3.2 太陽粒子線

太陽活動には約 11 年周期のサイクルがある。ワルドマイヤーらが 1755 年に始まる太陽活動のピークをサイクル1と決め、そこをスタートとして太陽活動のサイクルに順次番号を付けている。飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡(SMART)で観測した 2008 年 1 月 5 日の太陽画像(図 3-2 参照、[11])には、新しいサイクルの活動領域(北緯約 27~29°)と古いサイクルの活動領域(南緯約 2~15°)の両方がうつっている(両者の太陽面上での距離は約 47 万km)。前回のサイクル第 23 太陽活動周期は、1996 年から始まり、2001 年ごろが黒点の数が最も多くなる極大期であった。2008 年 1 月 4 日に太陽表面の新しいサイクルの活動領域に黒点が観測され、現在は第 24 太陽活動周期が始まったばかりである(図 3-3 参照)。

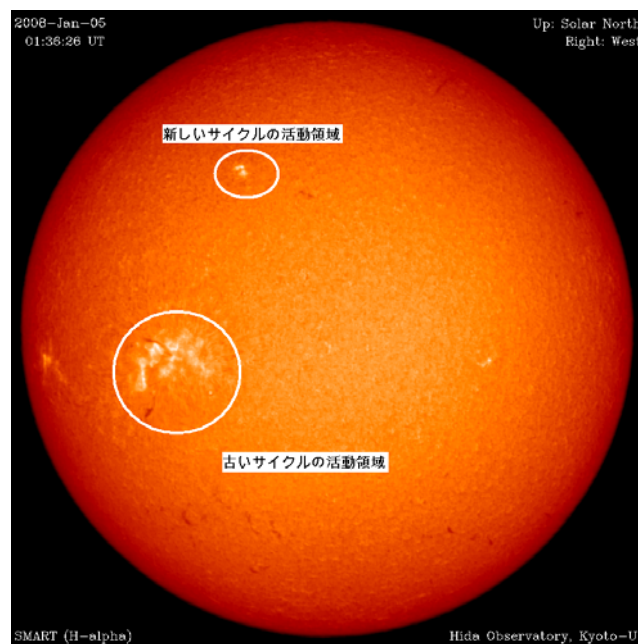


図 3-2 飛騨天文台の太陽磁場活動望遠鏡(SMART)で観測した 2008 年 1 月 5 日の太陽画像 [10]。

銀河宇宙線、太陽粒子線、地球磁場捉粒子線の粒子フラックスやエネルギー・電荷分布は、地球磁場の変動や太陽活動等多くのパラメータに複雑に依存して変化する。また、LEO では、一次宇宙線の強度が飛行する高度や軌道傾斜角、経度、緯度等で変化するため、1 周約 90 分の地球周回軌道をとる ISS 船内の放射線環境も時間的に大きく変動することになる。LEO において、低軌道傾斜角のみを取る飛翔体であれば、地磁気防護により、捕捉粒子線と高エネルギー銀河宇宙線による被ばくが中心となるが、ISS は軌道傾斜角が 51.6 度と大きいため、上記の 3 つの線源のすべてによる被ばくがある。粒子のフルエンスで見ると陽子が主であり、太陽活動によってその増減がある。また船内では船壁等との衝突により生じる二次粒子、特に中性子の被ばくも問題になる。また二次粒子は人体との相互作用でも生じる。

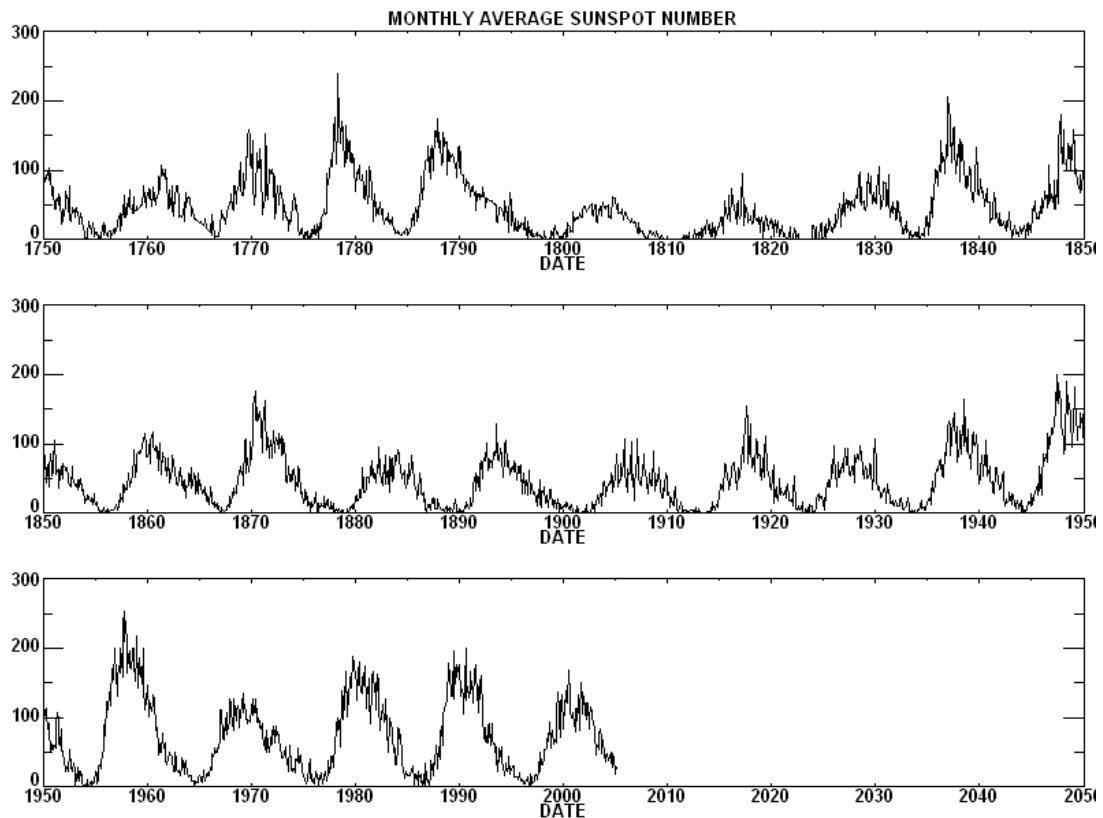


図 3-3 1755 年から計測されている太陽活動のサイクル[12]。縦軸は、月当りの平均発生黒点数。

太陽粒子現象(Solar Particle Event: SPE)は、太陽活動によって生じる太陽表面のフレアに伴い、突発的に高エネルギー粒子が放出される現象である。30MeVを越える全陽子フルエンスが  $10^6\text{cm}^{-2}$  (研究者により  $3 \times 10^6$  や  $10^7$  とする場合もある) 以上である場合を、SPEと定義する。SPEの頻度はそれほど高くないが太陽活動最大期によく起こり、その頻度は、太陽活動周期1サイクル当たり 50 回程度である[13]。10MeV以上の陽子のフルエンスが  $10^{10}\text{cm}^{-2}$  以上となるような巨大なSPEは、1サイクル当たり1、2回起こる。突発的な太陽フレアに伴うSPEの持続時間は短く(数時間程度)比較的電子のフラックスが多い。またフルエンスは  $10^7 \sim 10^8\text{cm}^{-2}$  程度である。しかし、コロナ質量放出に伴うSPEは持続時間が長く(数日程度)、陽子のフラックスが非常に大きい。また、全フルエンスは  $10^9\text{cm}^{-2}$  を超えることがある。SPEで太陽から放出される粒子のエネルギー・スペクトル、フラックス、組成等はフレアに規模のより異なる。大型の太陽フレアが起こった場合地磁気圏外では 1Sv/dayが記録されたこともある。

太陽フレアによる線量の増大は一時的なものであり、3ヶ月あるいは半年という宇宙搭載期間の平均線量率への寄与は相対的に小さい。ISS内での線量当量は1日平均約 1mSvと予測されていたが [14]が、SPEの規模が大きくまた長期間続いた場合には、付加的に非常に大きな線量を与える可能性がある。しかし、かなりの大型のSPEでなければ地球磁気圏にさえぎられてISS軌道まではあまり到達しない。積算型線量計で測定する際には、かなり大きなSPEの発生でなければ、積算線量

への寄与は確認できない。

### 3.3 地球磁場捉粒子

地球の周辺には太陽風の粒子が地球磁場に捉えられて出来たと考えられる放射線帯が存在する。放射線帯は、主要部が地表千 km から 2 万 km の内帯と、地球半径の 3 倍から 9 倍の高度に位置する外帯に分けられる。内帯はバンアレン帯(Van Allen belt)とも呼ばれ、陽子の集まりで高度 300 km から 1200km が下限となり、陽子のエネルギーは数 MeV から数百 MeV に分布する。この捕捉陽子のエネルギー分布を船内で見ると、数百 MeV のあたりにゆるやかなピークを持つ(図 3-5 下図参照)。外帯は 10000km 程度を下限とする電子の集まりで、エネルギーは数 keV 程度である。これらの地球磁場に捕捉された荷電粒子は、両極間の地磁気線に沿ってサイクロロン運動を繰り返しながら、電子は東方向に陽子は西方向に拡散していく。内帯には電子も捕捉されているがほとんどが 5MeV 以下でエネルギーが小さいので宇宙船の壁で容易に遮蔽される。このエネルギー領域では、制動 X 線が生成されるが、線量にはあまり寄与しない。また、外帯は強度の高い電子帯であるが ISS 軌道より十分上にあるので ISS 放射線環境には影響を与えない。

地球磁場捉粒子の分布はかなり安定であるが、地磁気嵐による攪乱を受け、11 年周期の太陽活動に影響される。地球磁場の軸がその回転軸からわずかにずれているので、ブラジル沖には地球磁場が地表に向かって異常に下垂した南大西洋異常域(South Atlantic Anomaly:SAA)と呼ばれる領域がある。ISS軌道はSAA領域と交差し、その期間補足陽子による線量率が急激に増加する。SAA補足陽子と高緯度銀河宇宙線のISS船内での線量への寄与は約半々と評価されている[9]。3.6.3(2)節に、SAAによる線量寄与と軌道傾斜角の関係を記述する。

### 3.4 二次粒子

ISS 船内の人体や、搭載された生物試料に影響を及ぼす主要な一次放射線の種類は、陽子から鉄核までの重荷電粒子線である。これらの一次粒子は、ISS の船体や搭載物質の内部で原子核反応や核カスケード・シャワーを引き起こし、陽子、中性子、中間子、反跳原子核等の核破碎生成物や電子、ガンマ線等の二次粒子を生成する。これらの二次粒子は、観測点周囲の遮蔽物質の種類や厚さに依存して大きく変化する。

### 3.5 中性子

二次粒子のひとつとして船内や人体内で生成される中性子は、さらなる核反応を引き起こし乗員の被ばくには大きな影響を与えると考えられている。ISS軌道では、中性子の線量寄与が線量当量の 30~60%に達するという評価がされているが [15]、これは、軌道高度、太陽活動、船壁等遮へい体の厚さ等によって異なる。

過去のISSの米国モジュール船内の実測値(2001年3-7月)では荷電粒子の線量が19.7 $\mu$ Sv/h(472 $\mu$ Sv/day)、中性子の線量が2.3 $\mu$ Sv/hであった。この中性子線量は、ボナー・ボール球型中性子モニタ装置(Bonner Ball Neutron Detector:BBND)で測定されたものである[16][17]。BBNDの計測範囲が熱中性子~15MeVなので、BBNDで測定できない15~100MeVの中性子の

寄与を考慮すると、実際の中性子線量は約2倍になると考えられ、米国モジュール船内の線量当量の内の中性子の寄与は約20%と推定された。

### 3.6 線量に影響する環境要因

#### 3.6.1 地球磁場捉陽子の高度依存性

ISS（平均軌道高度 400km、軌道傾斜角度 51.6°）では、太陽活動最小期の銀河宇宙線の寄与と地球磁場捉陽子の線量の寄与はほぼ等しいと見積もられている[9]が、詳しくみると、高度が高くなるにつれ、陽子フラックスが大きくなる。図 3-4 に 30MeV以上の補足陽子のフラックスと軌道高度の依存性を示す。AP8 計算コード[18]で得られた軌道と陽子フラックスの相関を示す。実線は補足陽子用のAP8 計算コードによる計算結果であり、■と□は実測値である。

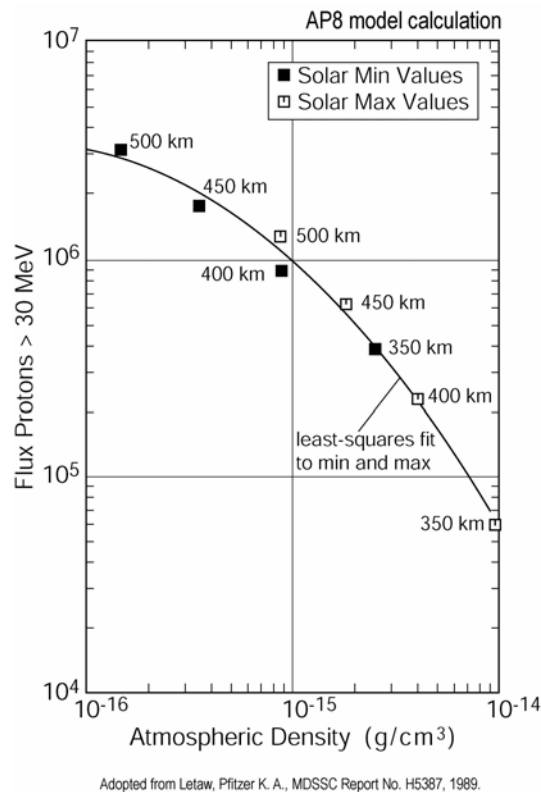


図 3-4 30MeV以上の補足陽子のフラックスと軌道高度の依存性。実線は補足陽子用のAP8 計算コードによる計算結果。■□は実測値[15]。

#### 3.6.2 方位角依存性

E.V. Benton等は、長期にわたる衛星実験(Long Duration Exposure Facility: LEDF)で、宇宙放射線の入射方向依存性を確認する実験を行った [19][20][21]。Benton等は、CR-39 プラスチック飛跡検出器を収納した立方体形状の受動型線量計をつかって測定を行った。南北東西方向に向けて設置したCR-39プラスチック飛跡検出器からLET分布を測定した結果、東西方向の陽子フラックスが南北方向より大きいことが確認された。Benton等は、SAA領域における入射粒子の非等



方性を指摘している。

また、ISS に搭載された高精細度ハイビジョン・カメラ(High Definition TeleVision: HDTV)の結果からも、搭載期間が同じでも、HTDV用 CCD 素子に画像上に白傷を発生させる永続的損傷が多く発生する時期とそうでない時期があることが確認されており、カメラの搭載した場所や方向の違いがその原因であることが示唆されている。

### 3.6.3 軌道傾斜角依存性

#### 3.6.3.1 極域と赤道域

宇宙船の周回軌道が赤道に対して何度傾いているかによって、被ばく線量は異なる。南北磁極近傍の磁力線は地表面に対してほぼ鉛直で、宇宙空間に対して開いており、また、荷電粒子は磁力線に沿った方向に動き易いので、ここには銀河宇宙線が侵入し易い。従って、極域を通過する際の線量率は高い。

赤道域では磁力線は地表面に対してほぼ水平で、さらに、荷電粒子は磁力線を横断しにくいいため、宇宙線は赤道域に侵入しにくい。地磁氣的に高緯度であるほど宇宙線線量率は大きくなる。

#### 3.6.3.2 南大西洋異常

地球近傍は、地球の磁場によって、銀河宇宙線や太陽粒子線の侵入からある程度まもられた領域となっている。しかし、地球磁場には歪みがあり、特にブラジル南部から南大西洋にかけての磁場の歪みは、3.3 節で述べたように南大西洋異常域(SAA)と呼ばれる。このSAA領域では、他の地域より地球磁場強度が約 30%も弱い。その上空の捕捉粒子線帯は、西経 0°から 60°、南緯 20°から 50°で高度 160 から 320kmのところをまで 30MeV以上の陽子の層が侵入している。従って、ISSやSAAと交差する軌道を持つスペース・シャトルでは、SAA通過時に大きな線量率を受ける。これまで、スペース・シャトルの軌道傾斜角は、28.5 度と 51.6 度の 2 つが採用されてきた。28.5 度の傾斜角の方が 51.6 度よりも SAA を通過する時間が短いので積算被ばく線量は少なくなる。ISS の軌道も当初 28.5 度が計画されていたが、ロシアの ISS 計画への参加により、カザフスタンのバイコヌール射場からのプログレスやソユーズの打ち上げ・ドッキングを考慮し、51.6 度の軌道傾斜角が採用された。

#### 3.6.4 観測点周囲の遮蔽状況

宇宙放射線場の成分は観測点周囲の遮蔽物質の種類や厚さに依存して変化する。ISS軌道における船外と船内の宇宙放射線エネルギー・スペクトルの推定を図 3-5 に示す[22]。図 3-5 上図の船外の宇宙放射線環境の推定には、補足陽子のためのAP8 モデル[18]、補足電子のためのAE8 モデル[23]、銀河宇宙線のためのCREMEコード[24]が使用されている。図 3-5 下図の船内の宇宙放射線環境の推定には、二次中性子・二次光子を含む補足陽子計算のためにHERMESコード[25]、二次光子・電子の計算ためにEGS4 コード[26]、He以上の重荷電粒子の計算のためにJINCコード[27][28]、二次中性子を含む太陽フレア粒子のためにHERMESコードが使用されている。ISS船

内では船壁が遮蔽として働くことにより、宇宙放射線のエネルギー・スペクトルが変化する。また、一次重荷電粒子は、船壁を通過する際に核破砕反応を引き起こし、中性子等の二次粒子を生成する。船壁の厚さが大きくなるほど、船内で測定される吸収線量は低くなるが、場所により遮蔽の状況が異なるため、観測する場所の違いも線量に影響する。過去のUSモジュールやロシア・サービス・モジュール船内の計測結果では、同時期同一のモジュール船内においても、場所により船壁や搭載ラックの厚さが異なるため、吸収線量には20~60%のばらつきがあった [29] [30]。

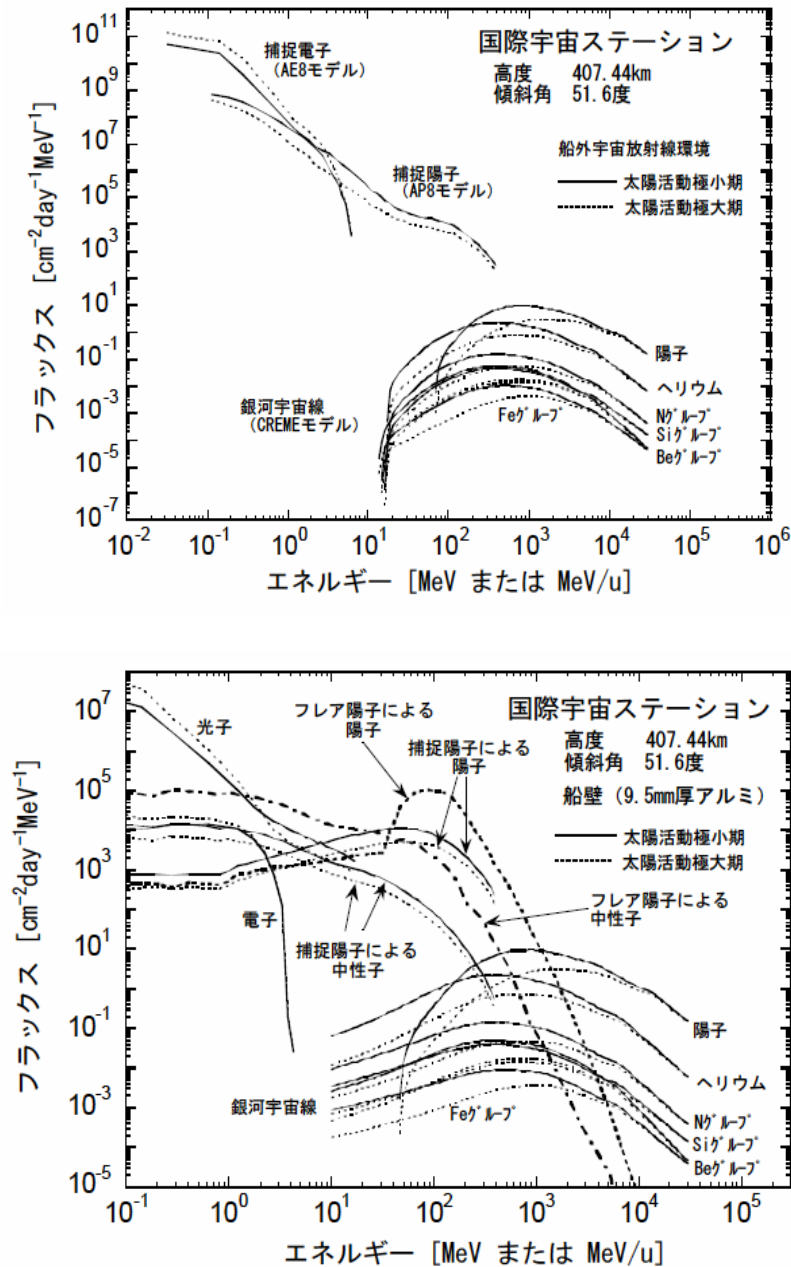


図 3-5 ISS 軌道における宇宙放射線エネルギー・スペクトルの推定。上: 船外、下: 船内(船壁 9.5mm)。

## 第4章 LEO での被ばく線量限度

LEOでは、非常に大きなSPEが発生する場合を除いて、急性確定的影響が発生するしきい値を超える線量を被ばくする恐れはない。ただし、長時間の船外活動では注意を要する。白内障や、重大な臨床的症状をもたらす骨髄、皮膚の損傷に関する晩発確定的影響は、被ばく線量制限値に基づいてこれをコントロールするように飛行計画が立案される。

これまでの実測から、国際宇宙ステーションに搭乗する宇宙飛行士の被ばく線量(実効線量)は、0.4~1mSv/day程度である。日本では、ICRPの勧告に基づき地上の放射線業務従事者の線量限度を50mSv/year (100mSv/5年間)と定めている。宇宙飛行士に対しては、骨髄に対する被ばく(体表から深さ5cmの部位における等価線量)が年間400mSvを超えないことがガイドラインとして定められている。表4-1に、ISS 搭乗日本人宇宙飛行士の被ばく線量の制限値を示す[22]。白内障や、重大な臨床的症状をもたらす骨髄、皮膚の損傷に関する晩発確定的影響は、被ばく線量制限値に基づいてこれをコントロールするように飛行計画が立案される。

表4-1 ISS 搭乗日本人宇宙飛行士の被ばく線量の制限値<sup>a</sup>

生涯実効線量当量制限値 (Sv)			
初飛行年齢	男性	女性	
27-29	0.6	0.6	
30-34	0.9	0.8	
35-39	1.0	0.9	
≥40	1.2	1.1	
組織線量当量制限値 (Sv)			
組織・臓器	1週間	1年間	生涯
骨髄	—	0.5	—
水晶体	0.5	2	5
皮膚	2	7	20
精巣	—	1	—

<sup>a</sup>制限値とは、この値を超えないよう最大限の努力が求められるものである。国内法令で超えてはならない値として定められた線量限度とは異なる。また、ISS 飛行中の緊急作業時には線量制限値を用いず、被ばくをできる限り低く抑える。

## 第5章 LEO 宇宙放射線測定機器に要求される仕様

宇宙飛行士の放射線防護に対して、宇宙放射線被ばく管理に係る米国放射線防護測定審議会(NCRP)レポートNo.142[31]では、宇宙放射線計測機器に対して $\pm 30\%$ 以内の線量測定精度が要求されている。また、このレポートでは、各国間の放射線計測機器の測定精度がこの要求精度の範囲内で一致することも要求している。過去の宇宙実験では、能動型線量計間、受動型線量計間、能動型－受動型線量計間において、同時期の計測結果が大きく異なっていた。各機器の計測原理が異なっていることや、搭載位置やその周辺の遮蔽状況の違い、各機器に対する適切な精度評価がされていなかったことが原因である。

地上と異なり宇宙では、線質の異なる、すなわち、等しい吸収線量でも生物に対して与える影響が異なる種々の線質の放射線が混在する。このような放射線混合場における生物の被ばく効果を調べるためには、吸収線量の測定とともに、RBEの大きな高LET放射線(数十～1000keV/ $\mu\text{m}$ )成分については、LET分布測定が必要である。放射線場のLET分布や平均線質係数は、宇宙放射線生物影響を研究する上で重要な指標となるパラメータであり、宇宙放射線に対する線量計にはこれらを測定できる機能が求められる。

PADLES線量計は、ISS日本実験モジュールきぼう船内で行われる宇宙生物実験の被ばく線量計測にも用いられる。きぼう船内の宇宙放射線環境は時間や場所、遮蔽条件によって大きく変化することが予想されるため、PADLES線量計は各生物試料近傍に設置する必要がある。生物試料は $-80\sim 37^{\circ}\text{C}$ で保管・培養されるため、生物試料とともに設置されるPADLES線量計も $-80\sim 37^{\circ}\text{C}$ のや湿度環境に曝されることになる。従って、PADLES線量計には、 $-80\sim 37^{\circ}\text{C}$ の広い温度環境でも性格に線量を測定できる機能が要求される。さらに、線量計素子は、組織等価、あるいは組織等価に近い軽元素組成の材料であることが望ましい。生物実験によっては、試料の特定部位を通過する重荷電粒子の種類やLETまたはエネルギーを測定することが求められる場合もある。また、PADLES線量計は、宇宙飛行士が船外活動中も携帯される。船外活動用宇宙服内部は、0.3気圧の酸素100%に保たれる。このような環境下でも正確に線量を測定できる必要がある。TLDとCR-39プラスチック飛跡検出器を組み合わせた本研究で開発したPADLES線量計は、これらの要求に良く適合する性能を持っている。

生物試料の被ばく線量計測や宇宙飛行士の個人被ばく管理のために使用される、能動型および受動型の線量計の性能の比較を表5-1に示す。

表 5-1 宇宙放射線計測用線量計の性能の比較

比較項目 \ 検出器	RRMD-III*	TLDのみ	OSLのみ	TLD + CR-39
検出器の種類	シリコン検出器	熱蛍光線量計	光刺激蛍光線量計	熱蛍光線量計 固体飛跡検出器
測定形式	実時間	積算	積算	積算
測定項目:吸収線量 (Gy)	○	○	○	○
測定項目:LET分布	○	×	×	○
測定項目:線量等量 (SV)	○	×	×	○
陽子に対する感度	○	○	○	○
He以上の重粒子に対する感度	○	△	△	○
中性子に対する感度	×	△	×	○
組織等価	×	△	×	○
生物試料、個人へ近傍設置	×	○	○	○
-80~37度での安定性	ND	○	○	○
搭載期間におけるフェーディング	なし	あり	あり	あり
LET range (LET/ $\mu\text{m}$ )	0.1~700keV/ $\mu\text{m}$	<10keV/ $\mu\text{m}$	<10keV/ $\mu\text{m}$	0.2~1000keV/ $\mu\text{m}$

\* RRMD-III : Real-time Radiation Monitoring Device-III。

過去の宇宙生物実験では、CR-39 プラスチック飛跡検出器の解析に時間がかかりすぎて生物試料の帰還直後に線量計測結果が取得できず、生物影響と線量の相関が正確にとれないことが問題点として指摘されていた。これまでのCR-39 プラスチック飛跡検出器の飛跡の形状計測では、人間が光学顕微鏡下でフォーカスをあわせながら確認したエッチピットを1個ずつ手動で形状測定を行い、飛跡生成感度を決定してきた。光学顕微鏡下でCR-39 プラスチック飛跡検出器表面にできた数ミクロンから数百ミクロンのエッチピットを数千個、一つ一つ計測していくと、1試料あたり数ヶ月の解析時間を費やし、多大な労力と時間がかかっていた。このような熟練を伴う解析技術を、ISS運用期間中(約十年以上)保持しながら、しかも年単位の解析時間を費やすことは、いくつもの宇宙放射線生物影響実験を同時に実施する上で、非常に大きな困難となる。

帰還した PADLES 線量計は、生物試料の解析スケジュールに合わせて、宇宙からの帰還した生物試料が変質・世代交代する前に、迅速に解析・線量評価を行わねばならない。今後、日本実験棟「きぼう」では、さまざまな宇宙生物実験が行われる予定であり、定期的に回収される多量の生物試料用ドシメータ・パッケージの線量計解析に対応するためには、専用の CR-39 プラスチック飛跡検出器の自動解析装置を開発し維持していくことが必須となる。本研究では、PADLES 線量計を迅速に解析するための機器及びソフトウェアの開発・整備も行った。

JAXA において、ISS での搭載実験のために準備された TLD 素子は、数千本に及ぶ。これらの素子の校正や品質管理、搭載前の選別をするために、素子の固体識別管理をする必要がある。また、数多くの宇宙実験に対応するためには、個々の素子の識別番号や校正値、使用履歴、測定結果を一元管理することが重要であり、本研究では、多数の TLD 素子を管理するためのソフトウェアの開発も行った。

## 第6章 各国の宇宙放射線計測の現状

ISS では、米国 (National Aeronautics and Space Administration: NASA)、ロシア (Russian Space Agency: RSA, Institute for Biomedical Problems: IBMP)、欧州 (European Space Agency: ESA, Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt: DLR) と日本 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) が主体となって、宇宙放射線計測を実施する。表 6-1 に ISS パートナー国が開発する主な搭載線量計の一覧を示す。

表 6-1 ISS パートナー国 (米国、ロシア、欧州、日本) における ISS 搭載用線量計の開発状況。

機関	線量計タイプ	名称	線量計の種類	内容
NASA	受動型	CPD	個人線量計 (TLD+CR-39)	ISSとスペース・シャトル搭乗員は常時携帯。各搭乗員のフライト毎に適宜交換。
	受動型	APD, RAM	環境線量計 (TLD+CR-39)	各クルーのISS滞在期間及びシャトル・フライト毎に適宜交換。
	能動型	TEPC	環境線量計 (組織等価比例計数管)	船内の線エネルギー (Linear Energy) 分布を計測。 積算線量データは常時ダウンリンク。 LETスペクトルデータは1週間に1回ダウンリンク。
		EV-CPDS (船外) IV-CPDS (船内)	環境線量計 (荷電粒子エネルギー・スペクトロメータ)	船内外で荷電粒子のエネルギー・スペクトルを計測。 線量率データは常時ダウンリンク。 エネルギー・スペクトルは少なくとも1日に1回ダウンリンク。
	受動型	HRD	緊急時の個人線量計 (高線量率用線量計)	ハンガリーが開発。軌道上で測定が可能。測定は吸収線量のみ。 搭乗員が線量の読みとり可能。 (EVA時にポケット線量計として使用) 通常時は、収納されている。年に2回交換。 高線量率時にTEPCのデータを補完する。
ロシア	受動型	ID-3	個人線量計 (TLD+CR-39)	ソユーズ搭乗員は常時携帯。各搭乗員のフライト毎に適宜交換。
			環境線量計 (TLD+CR-39)	各Increment毎に適宜交換。
	能動型	R-16	環境線量計 (電離箱)	線量率データは常時ダウンリンク。
能動型	DB-8	環境線量計 (LETスペクトロメータ)	LET分布データはPCMCIAに保存。	
ESA	受動型	HRD	個人線量計 (TLD)	ハンガリーが開発。軌道上で測定が可能。測定は吸収線量のみ。
	受動型	EuCPD	個人線量計 (TLD+CR-39)	DLRが開発。マトリョーシカ・プロジェクト等で搭載実績あり。
	受動型	名称不明	環境線量計 (TLD+CR-39)	イタリアINFNがナポリ大学と開発中。ALTCRISプロジェクトで搭載検証中。
	能動型	Lulin	個人線量計 (小型シリコン検出器)	ブルガリアが開発。LET分布測定用スペクトロメータ。
	能動型	DOSTEL	環境線量計 (シリコン検出器)	DLRが開発済み。スペース・シャトル、ISS搭載実績あり。LET分布測定用スペクトロメータ。
能動型	Si-rad	環境線量計 (シリコン検出器)	INFNがALTCRISプロジェクト搭載検証中。エネルギー・スペクトロメータ。	
日本	受動型	PADLES	個人/環境線量計 (TLD+CR-39)	装置・機器に設置する定点モニタリングや日本人宇宙飛行士の個人被ばく線量計として使用。スペース・シャトル搭載実績あり。
	能動型	RRMD-I, II, III	環境線量計 (シリコン検出器)	スペース・シャトル搭載実績あり。
	能動型	BBDN	環境線量計 (中性子モニタ)	ISS、スペース・シャトル搭載実績あり。

## 6.1 NASAの宇宙放射線計測

CR-39 プラスチック飛跡検出器は米国で開発され[32]、1981年のスペース・シャトル飛行実験で初めて宇宙飛行士の個人被ばく線量計として使用された。しかし、その後、宇宙飛行士の個人被ばく線量管理のためには使われなくなった。広いLET領域を持つ宇宙放射線計測には、TLD熱蛍光線量計とCR-39 プラスチック飛跡検出器の併用が必要であると認識されていたが、解析に時間がかかりすぎるのがCR-39 プラスチック飛跡検出器の使用を困難にしていた。

NASAでは、宇宙飛行士用の個人被ばく線量計(Crew Passive Dosimeter: CPD)、スペース・シャトル用の環境線量計(Area Passive Dosimeter: APD)、ISSの環境線量計(Radiation Area Monitor: RAM) が開発・運用されている[33]。RAM、CPD、APDの基本構造は同じである。1998年 Expedition 1(長期滞在番号を示す)から、Harshaw Bicron社のTLDのみが、線量計測に使用されてきた。2002年のNCRP-142[31]の勧告により、有人宇宙放射線計測での重要性が再認識され、USF-4 (American Technical Plastics社製)というCR-39 プラスチック飛跡検出器が高LET領域の被ばく線量計測に再び使用されることになった。NASAは、2003年からCR-39 プラスチック飛跡検出器の技術導入を開始し、熟練した研究者による完全な手動計測によって、高LET領域の計測が行われている。

2008年現在は、APD、CPD、RAM の中に、受動型線量計素子(Passive Radiation Dosimeters: PRDs)として、以下が封入されている。図6-1にCPD、RAMの写真を示す。

- ・TLD:TLD-100 (LiF:Mg,Ti) 成型タイプとペレット状の形状の異なる2種類が8個、TLD-300 (CaF<sub>2</sub>:Tm) 6個、TLD-600 (<sup>6</sup>LiF:Mg,Ti) 2個、TLD-700 (7LiF:Mg, Ti)2個、
- ・OSLD/Luxel 光刺激蛍光線量計(6個)、
- ・CR-39 プラスチック飛跡検出器 (2枚)。

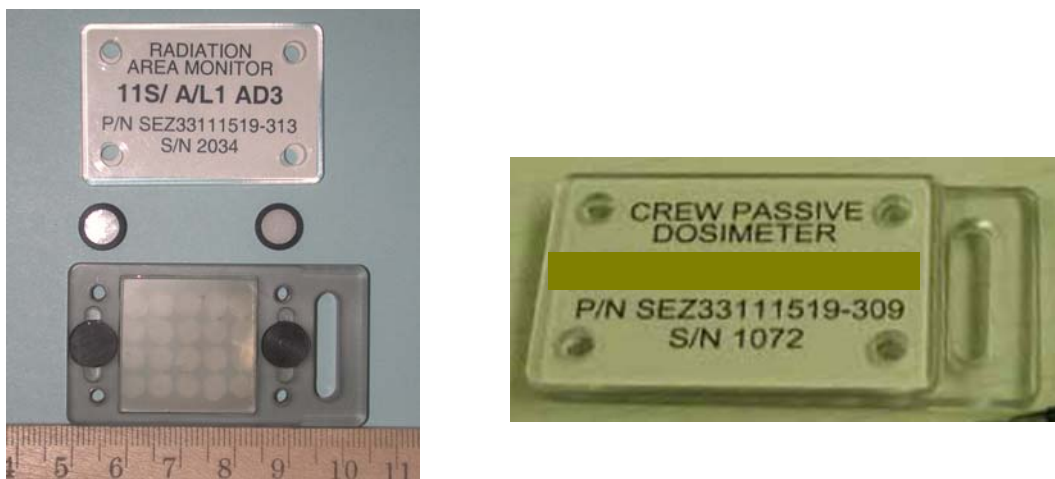


図 6-1 NASA の ISS 用環境線量計 RAM(左)と宇宙飛行士用線量計 CPD(右)。

Expedition 12 の搭乗員、STS-114 スペース・シャトル搭乗員の飛行から CR-39 プラスチック飛跡検出器をつかった新しいタイプの線量計による計測が開始されている。

RAM は米国モジュールだけでなく、ノード部、ロシア・サービス・モジュール部等、ISS 全体に18

個設置・交換され、継続的な定点エリア・モニタリングが実施されている。2008年からはESAの実験棟モジュールに2個、日本の実験棟モジュールに2個追加搭載され、全体で22個になる予定である。能動型線量計としては、可動式の組織等価型比例計数管(Tissue Equivalent Proportional Counter: TEPC) 1台、船内荷電粒子指向型スペクトロメータ(Intravehicular Charged Particle Directional Spectrometer: IV-CPDS)1台、船外荷電粒子指向型スペクトロメータ(Extravehicular Charged Particle Directional Spectrometer: EV-CPDS) 3台1式が使用されている。

## 6.2 RSA/IBMP の宇宙放射線計測

ロシアのRSA/IBMPでは、受動型線量計として、各ソユーズ搭乗員に1個ずつ支給される個人被ばく線量計ID-3 ISS(図6-2参照) [34][35]を使用している。この線量計は、2枚のCR-39プラスチック飛跡検出器(TASTRAK社製)の間に、9個のTLD(LiF:Mg,Ti、DTG4-2、Russian production社)を入れたTLDスペーサーを、ホルダー・ケース(タイプ1)に封入したものである。ホルダー・ケース(タイプ2)としてリーフレタス(*Lactuca sativa*)の種子がバイオ・マーカとしてCR-39プラスチック飛跡検出器やTLDと一緒に封入できるものもある。

ID-3線量計は、ロシア・サービス・モジュール内の定点エリア・モニタリング線量計としても使用されており、6箇所の船壁に設置・交換して使用されている。能動型線量計は、R-16電離箱1台、DB-8シリコン検出器4台から構成される放射線モニタリング・システム(RMS)がある。



図 6-2 RSAの個人/定点モニタリング用線量計(ID-3 ISS)。

## 6.3 欧州の宇宙放射線計測

ESA/DLRでは、受動型線量計として、EuCPD[36]を使用している(図6-3参照)。EuCPDは、Nomexのケース内に、3枚のCR-39プラスチック飛跡検出器と48個のTLDが封入されている。この線量計はベルトで着衣の上から巻くようになっており、胴体用に巻く長いベルトの着いた線量計と、脚部用に巻く短いベルトが着いた線量計がある。また、それぞれの線量計が船外活動用と船内活動用の2種類が準備されているのが特徴である。同じ構成の線量計が、2008年2月に搭載されたコロ



バス・モジュール内の定点モニタリングにも、8個の線量計が使用される予定である。

このほかに、太陽フレア発生時や船外活動時の緊急被ばく用の線量計として、10本のTLDのセットと軌道上で読み出し・アニーリングが可能なTLDリーダー・セットHRD (Pille-MKSシステム: KFKIAEKI, ハンガリー、図6-4参照) [37] [38]が搭載されている。このシステムは、NASA /ロシアの宇宙飛行士が商業利用機器として軌道上で使用することができる。Pille-MKSシステムのTLDは、硫酸カルシウム( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ )の白い結晶体が内部に封入されており、20mmφ、約12cmのアルミニウム製のシリンドラー・ホルダーに収納されている。

能動型線量計としては、シリコン検出器 DOSTEL2台、Si-RAD エネルギースペクトロメータ1台、中性子計測用ポータブル・シリコン検出器(PTB DOS-2002)等が搭載される予定である。コロンバス・モジュールの船外曝露部の技術曝露実験装置用EuTEFには、船内と同様のDOSTELが1台設置される予定である。

ESAでは、今後宇宙放射線計測や放射線生物影響に関連するプロジェクトが多い。前述したマトリョーシカ・プロジェクトやアルトクリス・プロジェクトの他にも、放射線生物影響実験DOBIES(代表研究者:ベルギー原子力研究センター)、衛星曝露実験(Biopan/Foton)、アストロバイオロジー実験(Expose-R, ExoMars)が2015年まで計画されている。

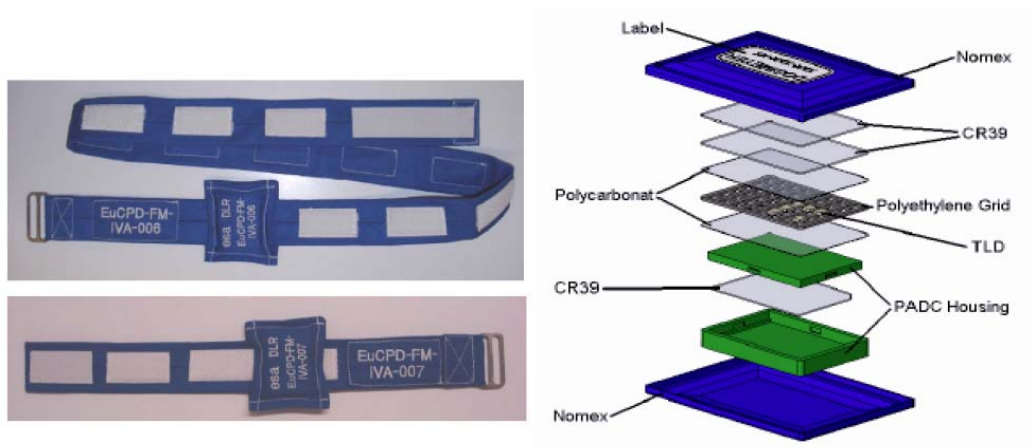


図6-3 ESA の個人被ばく線量計 (EuCPD)。

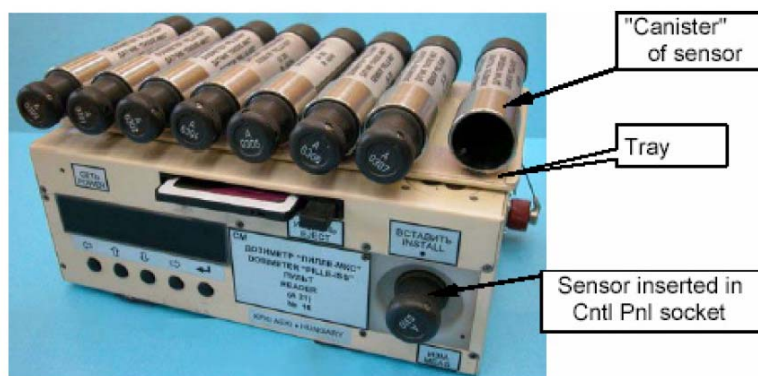


図6-4 Pille-MKS TLDとリーダー。

#### 6.4 日本の宙放射線計測

日本においてはNASDA(JAXAの前身)が参加したSTS-47(FMPT)[39]をはじめとして、IML-1、STS-47[40]、SL-J[41]、IML-2 [42][43]、STS-79[44][45][46]、STS-84[47]、STS-89[48]、STS-91[49]、STS-95 [50][51]等のフライトで、受動・積算型線量計を用いた多数の宇宙放射線計測実験が行われており、その物理測定データは宇宙放射線生物影響実験のためにも提供されてきた。表 6-2 に、日本で行われてきた主要な宇宙放射線計測実験と宇宙放射線生物影響実験の概要を示す。

STS-89 とJ-Mirで行われたヒト由来付着性細胞の宇宙放射線生物影響(代表研究者:大西武雄・奈良県立医科大学)では、CR-39 プラスチック飛跡検出材上に付着させた培養細胞を宇宙放射線にばく露し、試料上に現れるGrain (DNAの切断部位を可視化したもの)と重粒子線との相関性が検討された。STS-91 では、人体等価物質下での線量計測(代表研究者:藤高 和信・放射線医学総合研究所)が人体ファントム中に埋め込まれたTLD、CR-39 プラスチック飛跡検出器、ガラス線量計で行われた。また、STS-95 では、ヒト細胞における宇宙放射線及び微小重力による癌遺伝子の変化を調べるために、ドシメータ・パッケージ(TLD /CR-39 プラスチック飛跡検出器)で線量計測が行われた(代表研究者:池永満生・京都大学)。これまでの宇宙放射線影響を調べる生物実験から、カイコの奇形率の増加、大腸菌への点突然変異の誘発等を示唆する結果が得られており、宇宙放射線ばく露のリスク評価において、高エネルギー重粒子線の突然変異誘発効果、陽子線と重荷電粒子の複合放射線による低線量率での長期被ばくの生物影響解明の必要性が明らかになった。

表 6-2 日本が過去に実施した宇宙実験例と主な成果。

	項目(代表研究者・時期)	フライト名	主な結果(放射線測定器)
生物影響 実験	宇宙放射線の遺伝的影響 (池永満生 1992.9)	STS-47 FMPT	有意に高い伴性劣性 致死突然変異率 (受動型線量計:TLD+CR-39)
	宇宙放射線による DNA 損傷の解析 (大西武雄 1997.7;1998.1)	STS-89 STS-91	複合放射線による 低線量率効果の発見 (受動型線量計:TLD+CR-39)
	ヒト細胞における宇宙放射線及び 微小重力による癌遺伝子の変化 (池永満生 1998.10)	STS-95	
物理計測 実験	重荷電粒子線計測 (長岡俊治 1992,1; 1992,9)	STS-42 IML-1 STS-47 FMPT	陽子線及び重荷電粒子線の飛跡 及び線量計測 (受動型線量計:TLD+CR-39)
	重荷電粒子線計測 (道家忠義 1994.7;1996.9; 1997.5;1998.2;1998.6)	STS-65 IML-2, STS-79,STS-84, STS-89,STS-91	陽子線及び重荷電粒子線の実時間 線量計測 (実時間放射線計測装置: RRMD-II及びRRMD-III,受動型 線量計:TLD+CR-39)
	中性子線計測 (五家建夫 1998.6;2001.3-11)	STS-91,STS-101	船内中性子線の実時間計測 (ボナー球型実時間中性子計測装 置:BBND)

## 第7章 PADLES 線量計素子とパッケージ

### 7.1 PADLES 線量計素子

PADLES 線量計では、2 種類の受動・積算型素子、CR-39 プラスチック飛跡検出器(ハーツラス TD-1、フクビ化学工業社製)と TLD(MSO-S、極光社製)を使用する。両素子のデータを組み合わせて宇宙放射線に対する全 LET 領域の吸収線量と線量当量、平均の線質係数の測定を行う。CR-39 プラスチック飛跡検出器は宇宙放射線中の高 LET 成分( $\geq 10\text{keV}/\mu\text{m}$ )の LET 分布を測定するために用い、TLD は主として低 LET 領域( $< 10\text{keV}/\mu\text{m}$ )の吸収線量を測定するために用いる。

CR-39 プラスチック飛跡検出器は、Diethylenglycol-bis-allyl carbonate (CR-39)を重合したポリマーで、元素組成は $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$ 、実効原子番号 8.8 である[52][53][54][55]。PADLES線量計で用いるハーツラスTD-1 は、CR-39 モノマーに 0.1%の酸化防止剤(NAUGARD445)を添加して重合したポリマーである。厚さは 0.9mmのものを使用している。CR-39 のようなプラスチック、鉱物やガラス等の絶縁性固体に電気を帯びた粒子が入射すると、その粒子の飛跡に沿って損傷(潜在飛跡)が生じる。化学エッチング処理をすると、周囲の損傷を受けていないバルク部分より、損傷した部分が速く侵食されるので、エッチピットといわれる穴ができる。このエッチピットの形状を詳しく調べることで、入射した粒子の位置や飛来方向、電荷状態やエネルギー等のさまざまな情報を得ることができる。

TLDは、発光中心となるTbやTi等の添加剤を $\text{CaF}_2$ 、 $\text{LiF}$ 、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 等の結晶体と混ぜて高温で焼結し、ペレット状に形成したもの、または粉末をパイレックスガラス容器等に封入したものである。PADLES線量計で用いるMSO-S素子は、 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{:Tb}$ の粉末を長さ 12mm直径 2mmのパイレックスガラス容器にアルゴンガスとともに封入したものである。熱蛍光体では、放射線のエネルギーを吸収することにより電離した電子が、添加剤のためにできた純安定状態に束縛される。この状態で加熱されると、電子状態が変化して、束縛電子の脱励起が起こる。脱励起光(熱蛍光)の強度は吸収した放射線のエネルギーに比例するため、脱励起光の強度を測定することにより、熱蛍光体による吸収線量測定が可能となる。吸収線量測定後の熱蛍光線量計は、アニーリングすることで再利用することができる。 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{:Tb}$ は毒性がなく、熱的・化学的に安定であり宇宙搭載に適している。実効原子番号は 11.1 と小さく高感度のTLDの中では比較的組織等価な値に近い。比重は  $3.21\text{ g/cm}^3$  で融点は  $1910\text{ }^\circ\text{C}$ である。熱蛍光スペクトルは 390 nm から 560 nmの波長範囲にあり市販の光電子増倍管の波長特性に良く適合する。グロー・ピーク温度は  $190\text{ }^\circ\text{C}$ で、 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以下では熱蛍光を生じない。グロー・ピーク温度が高いためフェーディングを起こしにくい。ガンマ線照射では、 $0.01\text{ mGy}$  から  $10\text{ Gy}$ で吸収線量に対する応答直線性があり、室温での長期フェーディングが殆どなく(5%以下/6 ヶ月)、重荷電粒子混合場でも再現性の高い長期間測定が可能であると期待される。他の熱蛍光線量計・光刺激線量計の特徴との比較を表 7-1 に示す。

表 7-1 熱蛍光線量計・光刺激線量計の特徴の比較[56][57]。

種類	実効原子番号	線量範囲 (Gy, <sup>60</sup> Coに対して 線形応答を示す領域)	安定性		備考
			熱による劣化 (25°C、γ線照射に 対する応答)	光学的劣化	
BeO	7.13	2×10 <sup>4</sup> - 20	5% in 5 hr	ほとんどない	実効原子番号は組織等価であるが、感度が低い。安定性は比較的良好い。
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn	7.26	10 <sup>4</sup> - 3	10% in 2 months	ほとんどない	
LiF:Mg, Ti	8.2	10 <sup>4</sup> - 6	5% in 1 year	ほとんどない	
LiF:Mg, Cu	8.2	5×10 <sup>5</sup> - 10		ほとんどない	
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> :Tb	11.1	10 <sup>6</sup> - 10	5% in 6 month	ある	実効原子番号は軟組織よりやや高いが感度が高いので再現性が良い。安定性は比較的良好い。
CaSO <sub>4</sub> :Tm	15.2	10 <sup>6</sup> - 10	15% in 2 days	ある	実効原子番号は軟組織より高い。感度が高いので再現性が良い。安定性は悪い。
CaF <sub>2</sub> :Mn	16.6	10 <sup>6</sup> - 10	1% in 1 day	-	
CaF <sub>2</sub> :Dy	16.3	10 <sup>7</sup> - 10	13% in 1 month	-	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :C	12.04	10 <sup>6</sup> - 10	0% in 3 month	ほとんどない	線量計正面より上下左右60°以内で20%の方向依存性がある。

## 7.2 PADLES パッケージ

PADLES線量計の標準型ドシメータ・パッケージの構造と外観を図 6-1 及び図 6-2 に示す。標準型ドシメータ・パッケージでは、図 7-1 に示すように、2 個のCR-39 スタック(それぞれ 2 枚組み)で TLD-MSO-S素子をはさむ構造になっている。CR-39 プラスチックの板が互いに密着すると飛跡生成感度が変化するので、板の両側にカプトン・テープを張り板の間に隙間を設けるようにしてある。CR-39 スタックには、CR-39 プラスチック飛跡検出器の感度変化を確認するために、LETが既知の CイオンとFeイオンをあらかじめ照射した参照用試料が含まれている。線量計本体は図7-2 のようにアルミ・ヒートシール・バッグに空気とともに封入される。これは、搭載中の湿度変化や、宇宙飛行士が船外活動を行う際に着用する宇宙服内での酸素分圧変化(0.3 気圧、100% 酸素)によるCR-39 プラスチック飛跡検出器の感度変化を避けるためである。また、アルミ・ヒートシール・バッグに封入することにより、TLD-MSO-S素子に対する紫外線の影響を避けることができる。標準型PADLESドシメータ・パッケージでは、TLD-MSO-S素子を7本使用する。PADLES線量計用に現在、約2500本のTLD素子が準備されている。これらの素子には製造ロット(200 素子)単位で、<sup>60</sup>Co-γ線源を用いて 100[mGy·air]の線量を照射し、100[mGy·air]±5%以内の応答を示すものを、宇宙実験に使用する。

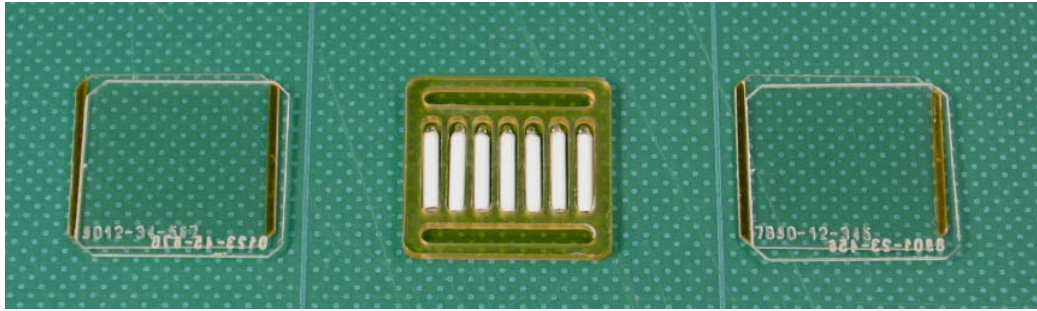


図 7-1 標準型 PADLES ドシメータ・パッケージ内の素子の構成。左右は約 2.5cm 角の板を二枚組み合わせた CR-39 スタック。中央は、アクリル・ホルダーに納められた 7 個の TLD-MSO-S 素子。



図 7-2 アルミ・ヒートシール・バックに空気とともに封入された PADLES パッケージ(約 3.5cm 角)。

## 第8章 PADLES 線量計算方法

PADLES線量計では、宇宙放射線曝露期間中の積分値として全LET領域に対する水等価吸収線量 ( $D_{\text{TOTAL}}$ ) と線量当量 ( $H_{\text{TOTAL}}$ )、平均線質係数 ( $Q_{\text{AVE}}$ ) を評価する[58][59][60]。以下にPADLES線量計を用いた線量計測方法について述べる。

TLD-MSO-SとハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器から得られた計測値から線量計算をするに当たり、本研究では地上照射実験を行って、それぞれの線量計素子の種々の特性をガンマ線、陽子線及び重イオン線を用いて調べ、線量計算で使用する校正係数や補正係数等を求めた。地上照射実験やその測定結果と考察については第9章に詳述する。

### 8.1 TLD-MSO-S が実測する水等価吸収線量

TLD-MSO-Sによる水等価吸収線量実測値  $D_{\text{TLD}}[\text{Gy-water}]$  は、専用TLDリーダーで読み出された値(相対熱蛍光量)  $M$  から以下の式を用いて得られる。

$$D_{\text{TLD}} = MK_{\text{proton}} f_0 f_F \quad [\text{Gy-water}], \quad (8-1)$$

- $M$  : 相対熱蛍光量 (TLD リーダー読み出し値)、
- $K_{\text{proton}}$  : 陽子に対する水等価吸収線量への換算係数、
- $f_0$  : 入射角度補正係数、
- $f_F$  : フェーディング補正係数。

地上における線量計測では、TLDリーダーで読み出された相対熱蛍光量  $M$  を線量に換算する係数はガンマ線照射によって評価されることが多い。しかし、図 3-5 のISS船内エネルギー・スペクトルのをみると、粒子フラックスの最も高いのは捕捉陽子線と太陽フレアによる陽子線であり、そのピークは数百MeV付近にあると推定されている。ISS船内宇宙放射線環境では、数百MeVの陽子線の吸収線量に寄与する割合は相対的に大きいと考えられる。従って本研究では、155MeV陽子(加速器からのプライマリ・エネルギー160MeV)を最大 2Gyまでの範囲でTLD-MSO-S素子に照射し(9.3.3.1節参照)、線量応答の直線性を確認した上で換算係数  $K_{\text{proton}}$  を決定した(9.4.3節参照)。

また、入射角度補正係数  $f_0$  を求めるために、155MeV陽子線を  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の入射角範囲でTLD-MSO-S素子に照射した(9.3.3.6節参照)。その結果、 $f_0=1$ と決定した(9.4.8節参照)。

生物実験に使用する PADLES 線量計は、生物試料とともに  $-80^\circ\text{C}$  から  $+37^\circ\text{C}$  の温度環境に置かれ、宇宙線曝露期間は標準で6ヶ月である。その他の宇宙実験では1年以上ISSに搭載されることもある。これらを考慮して、TLD-MSO-Sのフェーディング補正係数を求めた(9.3.3.3節、及び9.4.5節参照)。

TLDの熱蛍光効率(吸収線量当たりの熱蛍光量)は一般にLET依存性を持つ。特に、数keV/ $\mu\text{m}$ 以上の高LET放射線に対してはLETの増加とともに熱蛍光効率が急激に低下する。従って、TLDのみで測定された宇宙放射線に対する吸収線量は過小評価となる。9.4.7節で述べるように

TLD-MSO-Sも 10keV/μm以上の高LET放射線に対しては熱蛍光効率が急激に低下するので、式(8-1)で得られる $D_{TLD}$ も高LET成分を含む宇宙放射線に対しては過小評価となる。PADLES線量計では、高LET領域の吸収線量をハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器で測定したLET分布から測定し、TLD-MSO-Sの吸収線量に対する過小評価を補正する(8.4 節、式(8-12)及び式(8-15)参照)。

## 8.2 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器を用いた高 LET 成分の LET 分布の評価

重荷電粒子がCR-39 プラスチック等の絶縁性固体に入射すると、その飛跡に沿って損傷が生じる。この損傷部分を“潜在飛跡”と呼ぶ。重荷電粒子を照射したCR-39 プラスチックを化学エッチングすると、潜在飛跡に沿って“エッチピット”と呼ばれる穴が成長し粒子の飛跡を光学顕微鏡で観察できるようになる。重荷電粒子の入射によって潜在飛跡が生成したCR-39 プラスチックを化学エッチングした場合、潜在飛跡に沿ったエッチング速度をトラック・エッチ率、 $V_T$ 、損傷のない部分のエッチング速度をバルク・エッチ率、 $V_B$ と呼ぶ。飛跡生成感度 $V$ は、 $V_B$ に対する $V_T$ の比として定義される。エッチングで浸食された領域で $V_T$ と $V_B$ が一定である場合、図8-1に示すように、CR-39プラスチック表面に形成されるエッチピットの形状は潜在飛跡を中心軸とする円錐で良く近似できる。この場合、飛跡生成感度 $V$ はエッチピット開口部の長径 $D$ と短径 $d$ 、バルク・エッチ量 $B$ を用いて以下のように表される[55]。

$$V \equiv V_T/V_B = \sqrt{\frac{16D^2B^2}{(4B^2 - d^2)^2} + 1} \quad (8-2)$$

また、入射粒子のCR-39プラスチック板表面に対する伏角は次式で表される。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{4B^2 + D_1^2}{\sqrt{16d^2B^2 + (4B^2 - D_1^2)^2}}\right) \text{ [rad]} \quad (8-3)$$

入射粒子のLETは飛跡生成感度 $V$ から校正曲線を使用して求めることができる。校正曲線とは、限定された線エネルギー付与 $REL\omega_0$ と飛跡生成感度 $V$ の関係を表わしたものである。 $REL\omega_0$ は飛跡に沿った重荷電粒子の全エネルギー損失率から、潜在飛跡生成に関与しないエネルギー $\omega_0$ 以上の二次電子( $\delta$ 線)の寄与を差し引いた量である。 $\omega_0$ は固体飛跡検出器の種類ごとに異なる固有値であり、実験的に得られるものである。CR-39の場合 $\omega_0=200\text{eV}$ である[61]。本研究では、重イオン実験によりハーツラスTD-1プラスチックの校正曲線を求めた(9.4.9節、図9-25参照)。入射粒子のLET (keV/μm-water)を求めるためには、校正曲線から求めた $REL\omega_0=200\text{eV}$  (MeVcm<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>-CR-39)に換算係数 $C$ をかける。図8-2に換算係数 $C$ を重荷電粒子のエネルギーの関数として示す[58]。 $C$ はエネルギーとともに増加し高エネルギー側では0.19という値を取る。本研究では、 $C$ を0.19と置いて宇宙放射線高LET成分の重荷電粒子のLETを求めた。

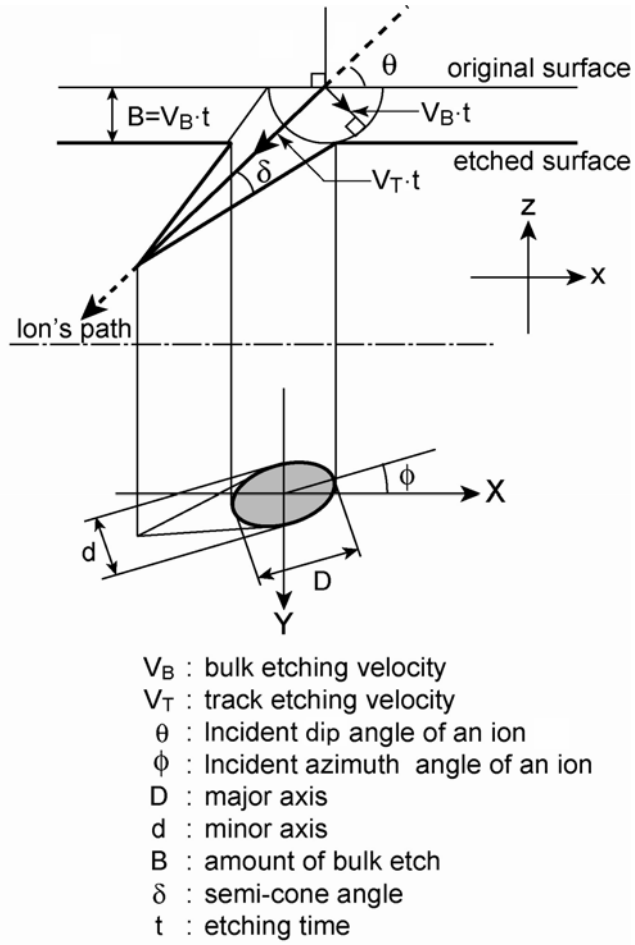


図 8.1 化学エッチングでCR-39 プラスチック表面に形成されるエッチピットの形状[55]。

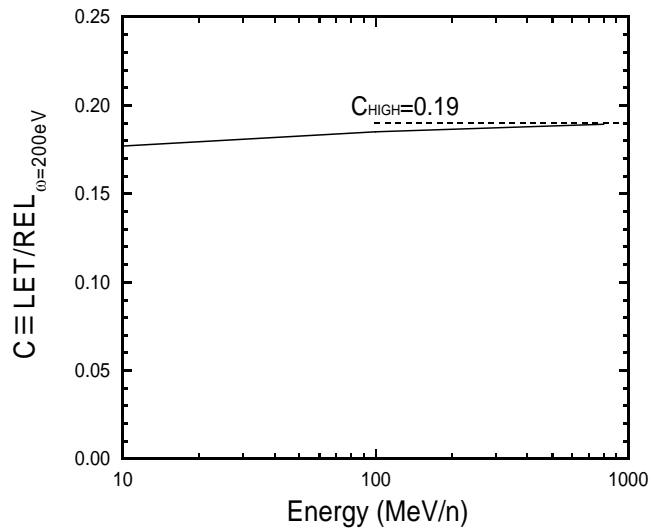


図 8.2 粒子エネルギーの関数として表した $REL_{\omega_0=200\text{eV}}$  ( $\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}\text{-CR-39}$ )に対するLET ( $\text{keV}/\mu\text{m}\cdot\text{water}$ )の比 $C_0$ 。



次に、CR-39 プラスチック飛跡検出器の幾何学的な検出効率 $D_{\text{eff}}$ を考察する。検出面が半径 $r=1$ の円形の検出器を考える場合、この検出面に垂直に入射する粒子にとって検出面積は $\pi$ となる。しかし、入射伏角が $\theta$  ( $0 < \theta \leq \pi/2$ )である粒子に対しては、検出面積は $\pi \sin \theta$ となる。一様等方な粒子線場において、入射伏角が $\theta$ から $\theta + d\theta$ である粒子の数は $2\pi \cos \theta d\theta$ に比例する。従って、入射伏角が $\theta$ から $\theta + d\theta$ である粒子が半径 $r=1$ の円形の検出面を持つ検出器に入射する数は、 $\sin \theta \cos \theta d\theta$ に比例する。CR-39 プラスチック飛跡検出器で検出可能な粒子飛跡の入射伏角の最小値を $\theta_{\text{cutoff}}$ とくと、 $D_{\text{eff}}$ は以下の式から計算される。

$$D_{\text{eff}} = \frac{\int_{\theta_{\text{cutoff}}}^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta} = 1 - \sin^2 \theta_{\text{cutoff}} \quad [\text{tracks/particle}]. \quad (8-4)$$

本研究ではLET分布の計算に、検出効率の逆数として定義される計数因子と呼ばれる値 $N_{\text{eff}}$ を導入する。

$$N_{\text{eff}} \equiv \frac{1}{D_{\text{eff}}} = (1 - \sin^2 \theta_{\text{cutoff}})^{-1} \quad (\text{particles/track}). \quad (8-5)$$

空間的に等方一様な粒子線場においては、検出面上に1個の飛跡が観測された時、実際に検出面に入射した重荷電粒子数の期待値は $N_{\text{eff}}$ である。

CR-39 プラスチックのような固体飛跡検出器では入射粒子の伏角がある臨界角 $\theta_c$  ( $\equiv \arcsin(1/V)$ )以下では原理的にエッチピットが形成されない[62]。検出器材質が均質で $V_T$ と $V_B$ が化学エッチング中に一定であり、潜在飛跡のサイズがエッチピットのサイズに比べて無視できるくらい小さい等の理想的な条件下では $\theta_{\text{cutoff}} = \theta_c$ と置くことができる。従って $\theta_{\text{cutoff}} = \arcsin(1/V)$ であり、これを式(8-4)及び式(8-5)に代入すると以下が得られる。

$$D_{\text{eff}} = \frac{V^2 - 1}{V^2} \quad (\text{particles/track}), \quad (8-6)$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{V^2}{V^2 - 1} \quad [\text{tracks/particle}]. \quad (8-7)$$

式(8-6)及び式(8-7)でわかるように、理想的な条件下では $D_{\text{eff}}$ 及び $N_{\text{eff}}$ を、飛跡生成感度 $V$ をパラメータとする単純な関数で表すことができる。しかし、PADLES線量計で使用するハーツラスTD-1 プラスチックには、飛跡生成感度に入射角依存性があることがわかっており[39] [63]、式(8-7)をそのまま使用するとLET分布測定に系統的な過小評価を生じる。道家等は、飛跡生成感度の入射角依存性を補正するため補正係数 $\eta(L)$ を導入した[39]。

$$N_{\text{eff}} = \eta \frac{V^2}{V^2 - 1} \quad [\text{tracks/particle}]. \quad (8-8)$$

安田等もハーツラスTD-1 プラスチックの $\eta(L)$ を評価している[64]。9.4.10 節で述べるように、本研究

でも詳しく入射角依存性を調べ、 $\eta(L)$  を見直した。

しかし、補正係数 $\eta(L)$ の使用は、低LET側で粒子のLETを過小評価にするという欠点がある。これを避けるためには、飛跡生成感度が変化しない入射伏角領域を確認し、直接 $\theta_{\text{cutoff}}$ を決定する必要がある[65]。本研究では、9.2節で述べるように、LRP試料を用いて $\text{LET} \leq 50 \text{ keV}/\mu\text{m}$ の範囲のLET分布を測定し、SRP試料を用いて $\text{LET} > 50 \text{ keV}/\mu\text{m}$ の範囲のLET分布を測定するが、9.4.10節で述べる測定結果から、それぞれの試料に対し $\theta_{\text{cutoff}}$ を以下のように設定するのが望ましいと考えられる。

LRP試料( $\text{LET} \leq 50 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ):  $\theta_{\text{cutoff}} = 80^\circ$ 、

SRP試料( $\text{LET} > 50 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ):  $\theta_{\text{cutoff}} = 60^\circ$ 。

上述の $\theta_{\text{cutoff}}$ を使用する場合、LRP試料とSRP試料のエッチピットを測定する際に、検出効率 $D_{\text{eff}}$ と計数因子 $N_{\text{eff}}$ は式(8-4)と式(8-5)からそれぞれ以下のように得られる。

LRP試料:  $D_{\text{eff}}=0.0302$ 、 $N_{\text{eff}}=33.2$ 、

SRP試料:  $D_{\text{eff}}=0.250$ 、 $N_{\text{eff}}=4.00$ 。

今後の宇宙放射線計測では、系統的誤差を避けるために、補正係数 $\eta(L)$ を使用するよりも、上で述べた $\theta_{\text{cutoff}}$ を使用する方法を適用するべきであると考えているが、これは今後の検討課題である。

粒子フラックスの微分LET分布は、 $1 \sim 10^4 \text{ keV}/\mu\text{m}$ の間を対数表示で等間隔になるように40分割して求める。微分LET分布は、各LETビンのエッチピット計数値に $N_{\text{eff}}$ を乗じたものを $\Delta N$ とし以下の式で表される。

$$\frac{dN}{dL} = \frac{\Delta N}{\Delta L} \frac{1}{TS\Omega} \quad [\text{particles s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1} (\text{keV}/\mu\text{m})^{-1}]. \quad (8-9)$$

ここで、 $\Delta L$ は各LETビン幅[keV/ $\mu\text{m}$ ]、 $T$ は観測時間[s]、 $S$ はスキャン面積[ $\text{cm}^2$ ]、 $\Omega$ は立体角(= $2\pi$ )である。

### 8.3 LET 分布から得られる吸収線量及び線量当量

式(8-9)の微分LET分布から、あるLETしきい値( $L_{\text{th}}$ )以上の吸収線量 $D_{\text{CR-39}}$ 、線量当量 $H_{\text{CR-39}}$ を算出することができる。

$$D_{\text{CR-39}} = 1.602 \times 10^{-6} 4\pi T \sum_{>L_{\text{th}}} \left( \frac{dN}{dL} L_c \Delta L \right) \quad (\text{mGy} \cdot \text{water}), \quad (8-10)$$

$$H_{\text{CR-39}} = 1.602 \times 10^{-6} 4\pi T \sum_{>L_{\text{th}}} \left( Q(L_c) \frac{dN}{dL} L_c \Delta L \right) \quad (\text{mSv}). \quad (8-11)$$

ここで、 $L_c$ は各LETビンの中央値、 $Q(L)$ は2.3節の式(2-2)でLETの関数として与えられた線質係数である。

#### 8.4 全吸収線量、全線量当量と平均線質係数

全LET領域の吸収線量 $D_{\text{TOTAL}}$ と線量当量 $H_{\text{TOTAL}}$ 及び平均線質係数 $Q_{\text{AVE}}$ は、道家等[1]によって提案された以下の式で算出できる。

$$\begin{aligned} D_{\text{TOTAL}} &= D_{<L_{\text{th}}} + D_{>L_{\text{th}}} = (D_{\text{TLD}} - \kappa D_{\text{CR-39}}) + D_{\text{CR-39}} \quad (\text{mGy}). \\ &= D_{\text{TLD}} + (1 - \kappa) D_{\text{CR-39}} \end{aligned} \quad (8-12)$$

$$H_{\text{TOTAL}} = D_{<L_{\text{th}}} + H_{>L_{\text{th}}} = (D_{\text{TLD}} - \kappa D_{\text{CR-39}}) + H_{\text{CR-39}} \quad (\text{mSv}). \quad (8-13)$$

$$Q_{\text{AVE}} = H_{\text{TOTAL}} / D_{\text{TOTAL}}. \quad (8-14)$$

線量当量の算出にICRP1990年勧告の $Q-L$ 関係を採用した場合、 $Q$ は $10\text{keV}/\mu\text{m}$ 以上で1以上となるので $L_{\text{th}}=10\text{keV}/\mu\text{m}$ と置く。また、 $\kappa$ は宇宙放射線場に対するTLD-MSO-S素子の熱蛍光応答の実効減衰率で、以下の式から計算される。

$$\kappa = \frac{\sum_{>L_{\text{th}}} (F(L_c) \Delta D(L_c))}{D_{\text{CR-39}}}. \quad (8-15)$$

ここで、 $\Delta D(L_c)$ はハーツラスTD-1プラスチックで測定された各LETビンから得られる吸収線量、 $F(L_c)$ はTLD-MSO-S素子の熱蛍光応答のLET依存性を表す関数である。本研究では9.3.3.5節で述べるように、TLD-MSO-S素子にLETの異なる種々の重イオン線を照射して吸収線量当たりの熱蛍光量のLET依存性を測定して、関数 $F(L)$ を9.4.7節に述べる式(9-8)のように決定した。

## 第9章 PADLES 線量計素子に対する地上実験

### 9.1 TLD-MSO-S 素子のアニーリングと熱蛍光量読み出し

TLD-MSO-S 素子は、使用直前に専用アニーリング・オープン(極光社製)を用いて 500°C、20 分の加熱処理(アニーリング)を行う。このアニーリング条件は、TLD-MSO-S 素子に 160MeV 陽子 (LET 0.54keV/μm, 10mGy)を照射した試料を用い、残留熱蛍光量の読み出し試験を繰り返し行い、決定した。

TLD-MSO-S 素子からの熱蛍光量は、照射直後に急激な初期変化を起こす[57](9.4.6 節参照)。これを避けるため、照射後 2 日置いてから熱蛍光量の読み出しを行う。熱蛍光量読み出しは、暗室にて素子を遮光用パッケージから取り出した後、TLD リーダー (KYOKKO2500、極光社製)を用いて行う。TLD リーダー内で素子を 20 秒間で室温から 500°Cまで連続昇温し、その内 30~400°Cまでの熱蛍光量を積算して、読み出し値とする。

### 9.2 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の解析

#### 9.2.1 化学エッチング

ハーツラス TD-1 プラスチックの化学エッチングは、70°Cの 7N 水酸化ナトリウム水溶液で行う。化学エッチング装置を図 9-1 に示す。

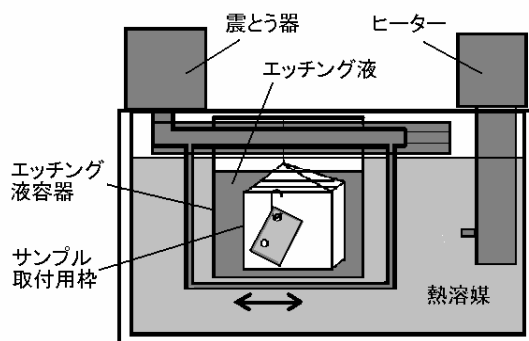


図 9-1 CR-39 プラスチック飛跡検出器の化学エッチング装置。

エッチング装置は、恒温水槽、温度制御部、震盪器、水酸化ナトリウム水溶液用蓋付きステンレス容器、試料取り付け用ステンレス枠からなる。震盪器で水酸化ナトリウム水溶液用ステンレス容器を動かすことにより、ステンレス容器の蓋をしたままエッチング中に水酸化ナトリウム水溶液の攪拌を行う。保温用として、エッチング装置の外側および上部に 5cm 厚の発泡スチロールを設置してある。高温水槽に入れる熱溶媒として、100%ジエチレングリコールを使用している。ジエチレングリコールは水に比べて蒸発による減少がほとんどない利点があり、熱溶媒の温度も 70°Cに設定した場合、70±0.1°Cの範囲で安定した。水酸化ナトリウム溶液は大型ステンレス容器の場合、1回のエッチングのために 5リットル使用する。水酸化ナトリウム水溶液は、最初に 7 規定強になるよう調整し、分析用

1.0M 塩酸溶液とフェノールフタレインを用いて滴定し、水を加えて水酸化ナトリウム濃度を 7.0 規定に調整してから使用する。ハーツラス TD-1 プラスチックの場合、バルク・エッチ率の測定値は 1.696 $\mu\text{m}/\text{h}$  であった。エッチング後は、プラスチック試料を流水で数時間以上洗浄して、シリカゲルを入れたデシケータ内で常温にて自然乾燥させる。

PADLES線量計測では、10keV/ $\mu\text{m}$ 以上の宇宙放射線成分のLET分布測定のために 2 種類のエッチング試料を準備する[19][66][67]。ひとつは、高LETであるが飛程の短い粒子 (Short Range Particle: SRP)を検出するために、短時間エッチングでバルク・エッチ量を抑えたエッチング試料 (SRP試料)である。もうひとつは低LETで長飛程の粒子 (Long Range Particles: LRP)を検出するための試料 (LRP試料)で、低LET粒子によるエッチピットを大きく成長させ、その形状を測定しやすくするために長時間エッチングする。本研究では、SRP試料は 5.5 時間、LRP試料は 13.5 時間エッチングした。

### 9.2.2 エッチピット画像取得

化学エッチング後のハーツラス TD-1 プラスチック表面のエッチピットの画像は、赤外線マーカー方式のオートフォーカス機構を採用したスキャン装置 (Luzex-SE, Nireco) で取得した。Luzex-SE は、コントラスト測定方式のオートフォーカス機構を採用した従来型の画像取得装置に比べて、スキャン速度が一桁程度速い。また、Luzex-SE のオートフォーカス方式は、格子状の赤外線マーカーが撮像視野全体に投影され、全体の反射率を見ながら1画面毎にオートフォーカスをかけるため、画面内にエッチピットや表面の部分的な傷や凹凸があってもデフォーカスしないという利点がある。LRP 試料と SRP 試料を Luzex-SE で撮像する場合の倍率、撮像視野、画像取得速度等を表 9-1 に示す。また、図 9-2 に Luzex-SE で取得したエッチピット画像例を示す。

表 9-1 Luzex-SE によるエッチピット画像の取得条件。

試料	項目	値
LRP	対物レンズ倍率	20
	撮像視野サイズ (pixels)	470×350
	画像分解能 ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	0.378
	撮像視野面積 $\mu\text{m}^2$	23484
	測定面積 1 $\text{cm}^2$ あたりの撮像視野枚数	4258
	画像取得速度(分/ $\text{cm}^2$ )	28
SRP	対物レンズ倍率	50
	撮像視野サイズ (pixels)	440×320
	画像分解能 ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )	0.149
	撮像視野面積 $\mu\text{m}^2$	3118
	測定面積 1 $\text{cm}^2$ あたりの撮像視野枚数	32072
	画像取得速度(分/ $\text{cm}^2$ )	534

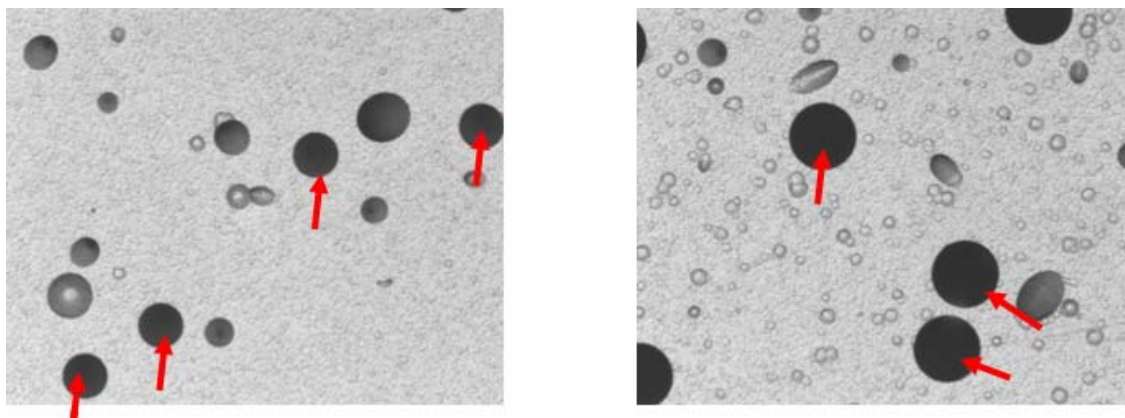


図 9-2 Luzex-SE で取得したエッチピット画像例。試料は、ISS ロシア・サービス・モジュールに 71 日間搭載した参照用試料を 13.5 時間エッチングしたものである。赤い矢印で示すのが、ISS 搭載前に照射した  $57.9 \text{ keV}/\mu\text{m}$  Si イオン(左)、 $204 \text{ keV}/\mu\text{m}$  Fe イオン(右)のエッチピットである。

Luzex-SE で取得したエッチピット画像は、グレー・レベル 256 階調の濃淡画像(ビットマップ形式)としてハード・ディスクに保存される。この濃淡画像からエッチピット開口部の形状を解析し、LET 分布測定に使用するエッチピットを選択する方法を次節に述べる。

### 9.2.3 粒子フルエンス検出面の定義とエッチピットの選択方法

ISS軌道上では、あらゆる方向から様々なエネルギーの粒子がハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器の表面に入射する。従って、図 9-3 に示すようにさまざまな形状のエッチピットが観測される。

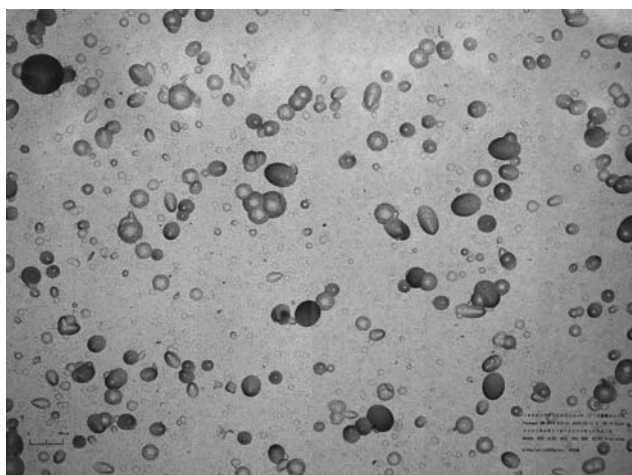


図 9-3 ISSロシア・サービス・モジュール内に 71 日間搭載されたCR-39プラスチック表面に化学エッチングにより形成されたエッチピット画像例。この試料は長時間エッチング(バルク・エッチ量  $73.8 \mu\text{m}$ )してエッチピットを大きく成長させたものである。

PADLES線量計では、CR-39プラスチック飛跡検出器を 2 枚組みのスタックにして使用している。図 9-4 に模式的に示すように、一方は検出器、他方はラジエータとしての役割を持っている。中性子

あるいは高エネルギー低LETの陽子が核反応によりラジエータ内で高LET粒子を発生し、その高LET粒子が検出器となるCR-39プラスチックに入射した場合(図9-4右端の例)も、エッチピットを形成されることになる。

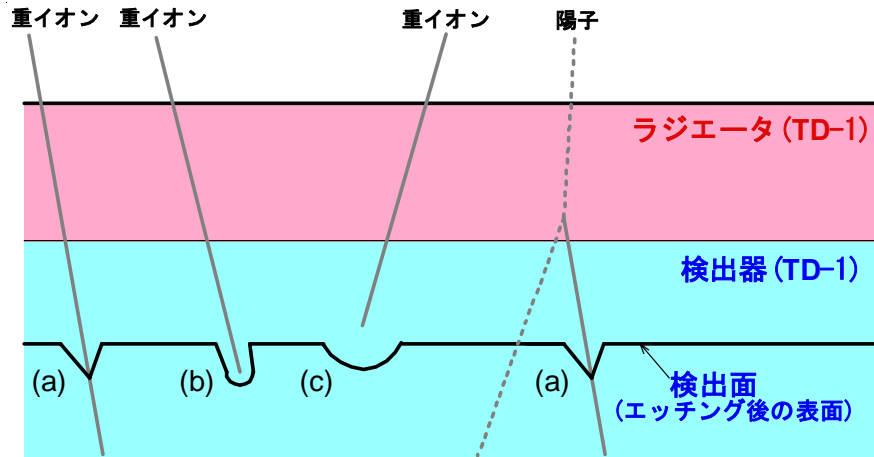


図9-4 PADLES線量計における2枚組CR-39スタックの構造(ラジエータと検出器)と検出面の定義。  
 検出面上には、粒子の飛程に対応するエッチピットの断面図を模式的に示す。

本計測手法では、エッチング後の表面を粒子フルエンス測定のための検出面と定義する。つまり、エッチング後の表面を通過した粒子のみを選別してLET分布を作成する。ここで、エッチング後の表面、すなわち、検出面を通過した粒子のみを、どのように選別し測定するかということが重要になる。それを説明するために、図9-4に模式的にエッチピットの断面図を示した。図9-4(a)は、飛程の長い粒子が検出面を通過した場合で、エッチピットは先端が尖った円錐形になる。この場合、エッチピット開口部は楕円形状を持っている。図9-4(b)は、粒子が検出面のすぐ下で止まった場合で、エッチピット開口部は楕円形状を保っているが、先端が少し丸くなる。図9-4(c)は、粒子が検出面の上で止まった場合で、エッチピットは丸く皿上になり、エッチピット開口部の形状から粒子のLETを測定することはできない。本研究では、図9-4の(a)と(b)のみを計測し、(c)のエッチピットを除くことで、検出面を通過した粒子のみを計測できると考えた。

さらに、詳しく考察するために、図9-5の左側に代表的なエッチピットの断面図を、右側にエッチピット開口部を上から見た画像例を示す。入射粒子のエネルギーが高くCR-39プラスチック表面から十分深くまで飛程がありエッチング後の表面と粒子の飛跡が交差している場合は図9-5(a)のように、先端の尖った円錐形のエッチピットが形成される。しかし、化学エッチングにより削り取られる表面の厚さより粒子の飛程が短い場合には、飛跡の先端から先のエッチングがバルク・エッチ率で等方に進むために、図9-5(b1)のように、先端の丸いエッチピットが形成される。このエッチピットの開口部は一部が楕円形状を保つが残りの部分は円形状になる。楕円形状の部分はLET情報を反映しているが、円形状になった部分からはLETを計測することはできない。さらにエッチングがすすむと、図9-5(b2)のように、エッチピット開口部は円形状になる。このように短飛程の粒子のエッチピット開口部の形状はエッチングが進むに連れ次第に楕円から円形に変化する。円形になったエッチピット開口

部はすでに粒子のLETの情報を失っている。PADLES線量計測手法では、図 9-5(a)のように開口部が楕円形状を持つ粒子のみを選択しLET分布作成に使用する。

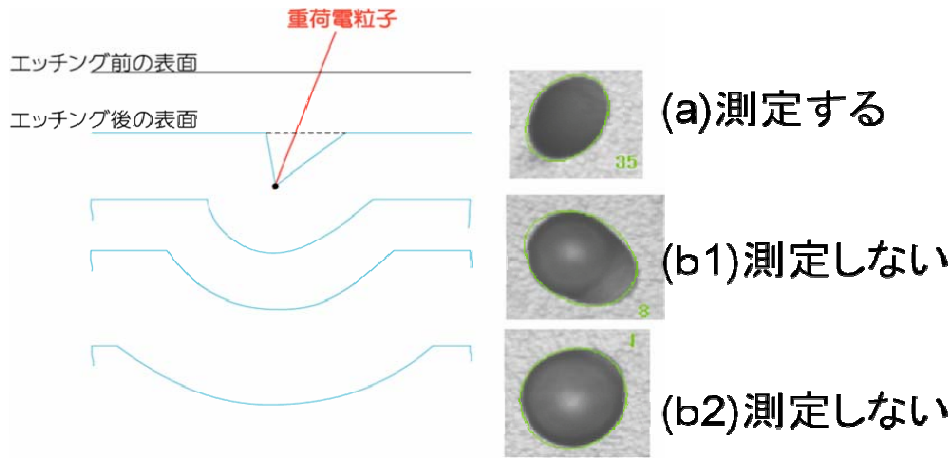


図 9-5 エッチピット断面(右)と開口部の画像例。水色の線はエッチング後の表面を表す。

### 9.3 地上照射実験

#### 9.3.1 TLD-MSO-S 素子による地上自然放射線の測定実験

CR-39 プラスチック飛跡検出器と TLD は受動・積算型の線量計素子であるため、TLD にはアニーリング直後からバックグラウンド放射線が蓄積される。また、CR-39 プラスチック飛跡検出器はアルミ蒸着ポリエチレン袋に封入されて製造者から供給されるが、PADLES 線量計パッケージを制作する際に袋は開封され、CR-39 プラスチック飛跡検出器は大気に曝される。この時点から、大気中に存在する気体状の放射性同位元素(主にラドン、トロン)からの  $\alpha$  線の潜在飛跡が CR-39 プラスチック飛跡検出器に蓄積されることになる。

PADLES 線量計パッケージを製作してから射場への引き渡し・宇宙への打ち上げまでは長い時間で数ヶ月を要する。また、宇宙から帰還した後、線量計素子の計測を始めるまでにも同様の期間を要する。この期間、地上の自然放射線や航空機輸送中の被ばくが生じ、バックグラウンド線量に寄与する。そこで、宇宙搭載期間中の正味の宇宙放射線による被ばく線量のみを計測するために、フライト線量計と対となる地上コントロール線量計を準備し、これにより地上での被ばく線量を評価して差し引く。

本研究では、JAXA 実験室で $-80^{\circ}\text{C}$ 、室温、 $37^{\circ}\text{C}$ に保管した TLD-MSO-S 素子のバックグラウンド線量の経時変化を 200 日まで測定した。測定結果と考察については 9.4.1 節に述べる。

#### 9.3.2 TLD-MSO-S 素子に対するガンマ線照射実験

JAXAが所有するTLD-MSO-S素子に対して、財団法人 放射線計測協会ではガンマ線( $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ )の照射を行った。放射線計測協会では、国家計量標準に対するトレーサビリティのある二次標準校正場でガンマ線照射を行っており、JIS Z 4511 に準拠している。 $^{60}\text{Co}$ ガンマ線に対しては



100mGy-airまで、<sup>137</sup>Csガンマ線に対しては 15mGy-airまで線量応答の直線性を調べ、そのデータからTLDリーダーのガンマ線に対する校正定数を求めた。また、TLD素子は、製造バッチ毎に特性が異なる可能性があるため、JAXAが所有する全TLD-MSO-S素子について、<sup>60</sup>Coガンマ線100[mGy-air]を照射してその応答を確認した。測定結果と考察については9.4.2節に述べる。

### 9.3.3 陽子線及び重イオン・ビーム照射実験

TLD-MSO-S素子とハーツラスTD-1プラスチックを組み合わせることで精度のよい宇宙放射線計測を行うには、宇宙放射線の主要成分である陽子から鉄核までの重荷電粒子に対するそれぞれの線量計素子の特性を詳しく調べる必要がある。そこで、放射線医学総合研究所の重イオン加速器HIMACの生物照射室で陽子線及び重イオン線を用いて両素子の特性試験を行った。

表9-2に、照射実験に使用した重イオン・ビームの核種とプライマリ・エネルギーを示す。

表9-2 地上照射実験で使用した重イオン・ビーム。

核種	プライマリ・エネルギー
H	160MeV
He	150MeV/n
C	135MeV/n、290MeV/n
Si	490MeV/n
Ar	500MeV/n
Fe	500MeV/n

図9-6に放射線医学総合研究所の重イオン加速器HIMAC生物照射室のビーム体系を示す。図9-6では、左側からHIMAC加速器からの重イオン・ビームが入射する。ビーム取り出し窓から約10m後方が照射野(図9-6の右端)であり照射試料を設置するための移動ステージが置かれている。図9-6の左側には重イオン・ビームの大きさを広げるための2台のwobblers電磁石と散乱体(scatterer)が設置されており、生物照射室に供給される重イオン・ビームの照射野でのビーム直径は10cmとなる。ビーム内の粒子フルエンス分布は安田等によって測定されており、Cイオン・ビーム(290 MeV/n)に対して±2.5%以内で均一であることが確認されている[68]。照射野の上流には、コリメータと重イオンのLETを変化させるためのバイナリ・フィルター(材質PMMA)が設置されている。

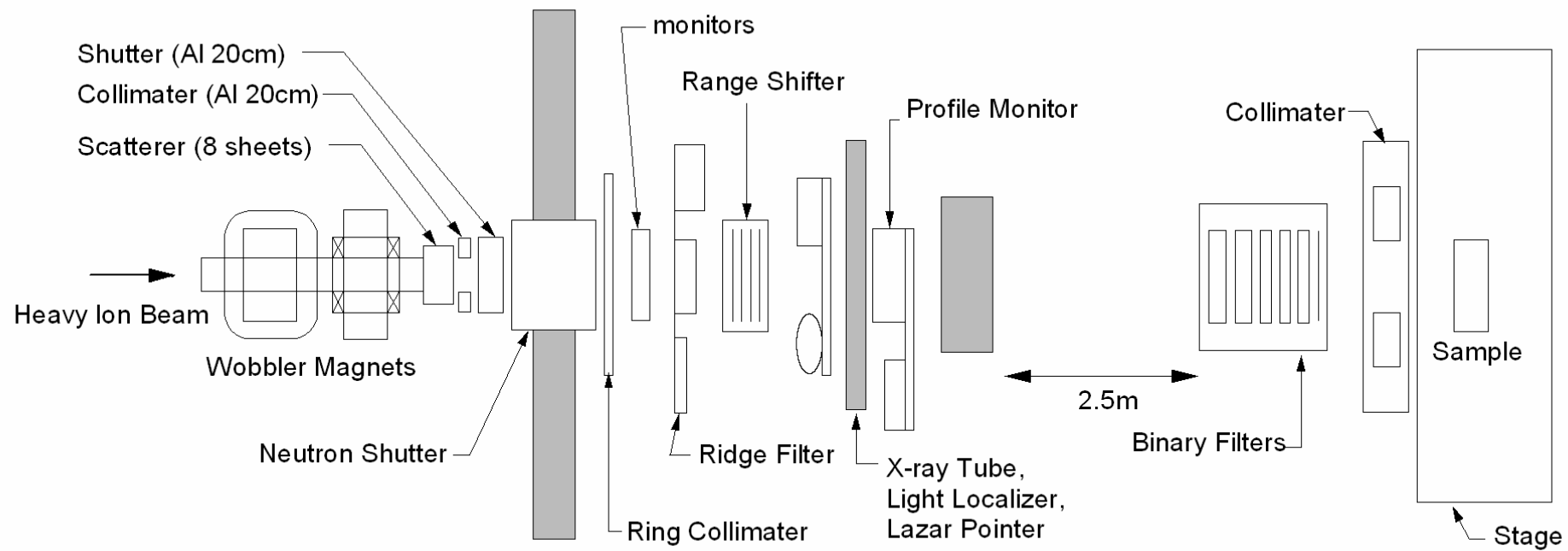


図 9-6 放射線医学総合研究所の重イオン加速器 HIMAC の生物照射室における実験体系。

生物照射室では、照射実験前に重イオン・ビームの照射深に対する線量率が測定され、そのデータが実験者に提供される。このデータは照射野の前方(ビーム上流)に設置されているバイナリ・フィルターの厚さを変え、照射野に置いた電離箱で吸収線量の変化を測定したもので、照射野における重イオン・ビームの水中でのBragg曲線に相当する。データ例を図 9-7 にグラフで示す[69]。このブラッグ曲線のデータに基づいて、照射野の置ける重イオン・ビームの水中飛程を評価した。次に、重イオン・ビームの水中飛程からSRIM2000 計算コード[70]を用いて照射野に到達する重イオンのエネルギーを計算した。

実際の照射では、次節以下で述べるように、TLD-MSO-S素子やハーツラスTD-1 プラスチック板は、照射用ドзимメータ・パッケージ等に収納して照射野に設置された。また、重イオン照射に使用できる核種とエネルギーが限られていたので、素子に照射されるLET値を変化させるために、バイナリ・フィルターやCu板をエネルギー・デグレータとして用いた。従って、解析対象となる素子の前方(ビーム上流側)にはパッケージ材やエネルギー・デグレータ等の物質が存在する。本実験では、SRIM2000 計算コードを用いて、解析対象となる素子の前方(ビーム上流側)に位置する物質によるエネルギー損失量をすべて見積もり、解析対象となる素子表面に入射する重イオン・ビームのLET[keV/μm-water]を算出した。

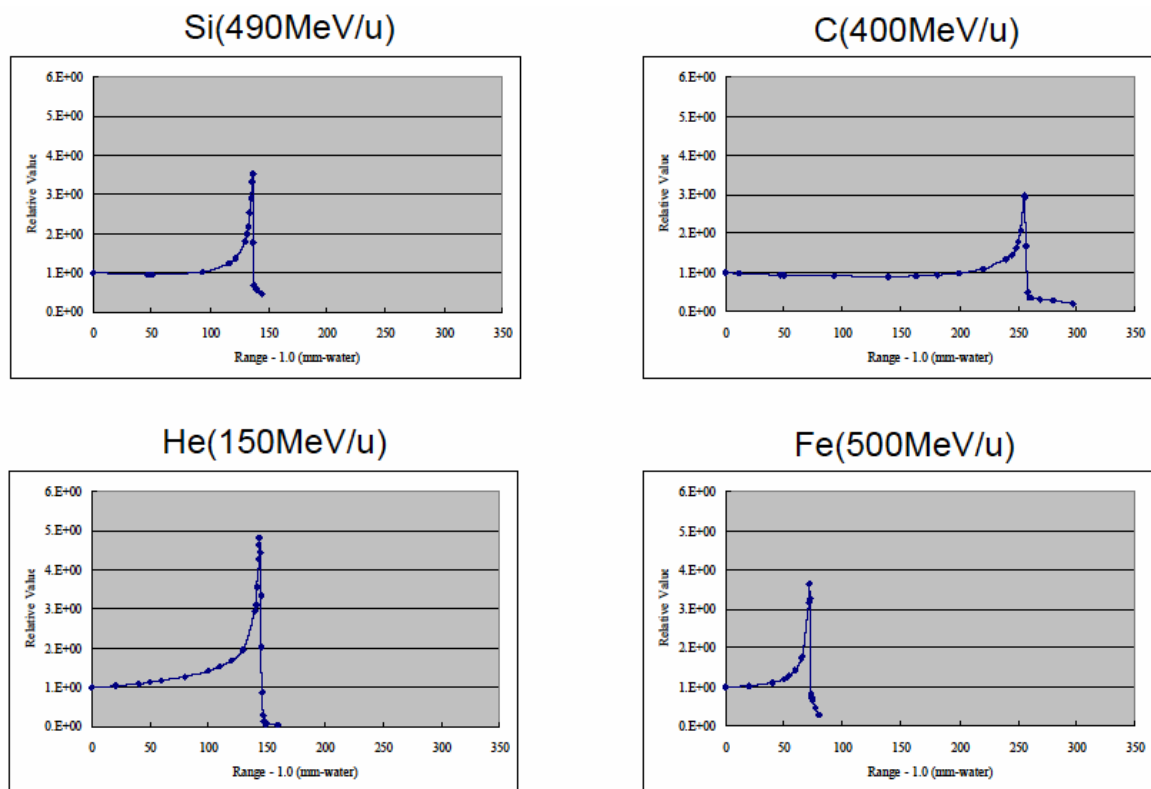


図 9-7 重イオン・ビームの照射野での照射深に対する吸収線量の変化[69]。縦軸が相対ビーム強度(相対吸収線量)、横軸は水中での飛程(mm)に相当する。

### 9.3.3.1 TLD-MSO-S素子の陽子線に対する線量応答実験

8.1 節で述べたように、宇宙放射線のフラックスの 90%以上は陽子であり、特に数百MeV陽子の宇宙放射線被ばくによる吸収線量に対する寄与は相対的に大きいと考えられる。そこで、8.1 節の式(8-1)の換算係数  $K_{\text{proton}}$  を決定するために、155MeV陽子線(プライマリ・エネルギー160MeV)をTLD-MSO-S素子に照射し熱蛍光効率を測定した。155MeV陽子のLETは  $0.54\text{keV}/\mu\text{m}$ と小さく、CR-39 プラスチック飛跡検出器では飛跡を測定できない。そこで、照射野に、プラスチック・シンチレータ(PMT:HAMAMATSU RB4497 H1161;NE102Aシンチレータ:応用光研工業株式会、75mm角、5mm厚)を設置し、TLD-MSO-S素子に入射する陽子数密度  $N(\text{protons}/\text{cm}^2)$  を計測した。TLD-MSO-S素子に対する水等価吸収線量  $D$  は、SRIM2000 計算コードで求めたLET値  $L$  ( $\text{keV}/\mu\text{m}\cdot\text{water}$ )を用いて次式で計算した。

$$D=N \times L \times 1.602 \times 10^{-9} \quad (\text{Gy}). \quad (9-1)$$

測定結果と考察については9.4.3 節に述べる。

### 9.3.3.2 TLD-MSO-S素子の重イオンに対する線量応答実験

TLD-MSO-S素子は通常ガンマ線やエックス線の線量測定に用いられており、1mR~100Rの範囲で線形応答を示す[57]。しかし、重荷電粒子照射に対して熱蛍光効率が線形である範囲は良くわかっていなかった。そこで、LETが  $10\sim 200 \text{keV}/\mu\text{m}$ 範囲でTLD-MSO-S素子の熱蛍光効率の吸収線量に対する依存性を調べた。宇宙軌道上にドシメータ・パッケージが搭載される最大期間は6ヶ月間と予想されたので、その期間にTLD-MSO-S素子が被ばくすると想定される最大吸収線量を考慮し、100mGyまでの線量範囲で熱蛍光効率を測定した。図 9-8 及び図 9-9 に示すように、TLD-MSO-S素子を、ポリカーボネート製のドシメータ・パッケージ(68 mm × 144 mm × 7mm)内のアクリル製のスペーサーに封入した状態で照射した。スペーサーの両側にはハーツラスTD-1 プラスチック板が1枚ずつ収納された。



図 9-8 重イオン・ビーム照射用ドシメータ・パッケージの実物写真。

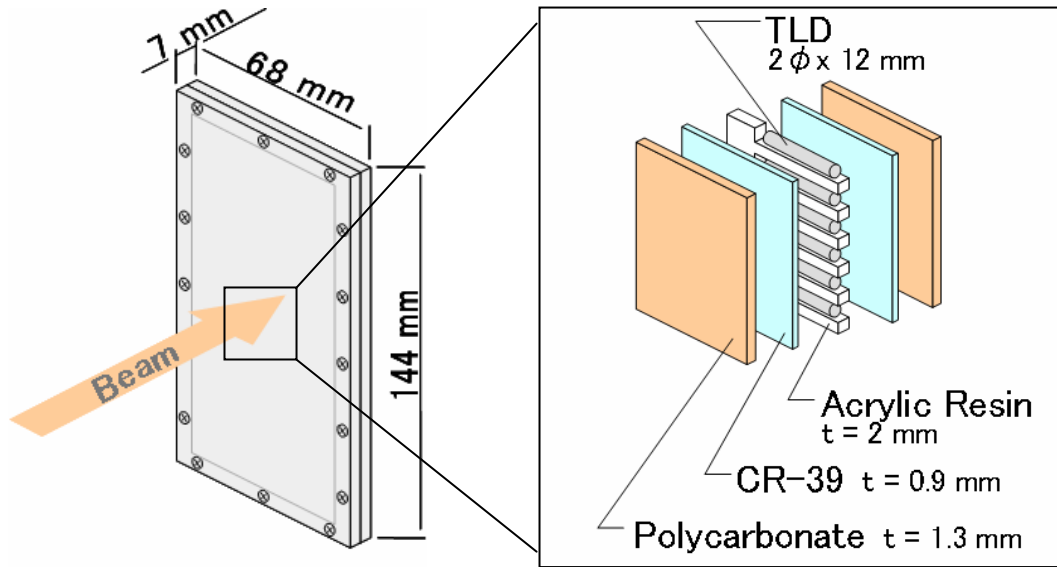


図 9-9 重イオン・ビーム照射用ドシメータ・パッケージの展開図。

照射後、TLD-MSO-S素子の前後に設置したハーツラスTD-1 板をエッチングし、個々のTLD-MSO-S素子が設置されていた領域を画像取得装置でスキャンし、それぞれのTLD-MSO-S素子に対する重イオン照射密度 $N(\text{ions}/\text{cm}^2)$ を計算した。 $N$ とSRIM2000 計算コードで求めたLET値 $L(\text{keV}/\mu\text{m}\cdot\text{water})$ から、TLD-MSO-S素子の重イオンに対する水等価吸収線量 $D$ を式(9-1)で算出した。測定結果と考察については9.4.4節に述べる。

### 9.3.3.3 TLD-MSO-S素子の長期フェーディング特性実験

ISS生物実験において、生物試料は最大180日間 $-80\sim 37^\circ\text{C}$ の培養・保存温度に保管される。生物試料の移動に伴い、PALDES線量計もこれらの温度環境に置かれる。TLDは保管温度と保存期間に依存すフェーディング現象を引き起こす[71][72]。そこで、 $0.54\sim 200\text{keV}/\mu\text{m}$ のLET範囲の重荷電粒子線をTLD-MSO-S素子に照射し、照射/保管温度をパラメータとしたフェーディング率の測定を行った。照射した重イオン・ビームの種類とLET、水等価吸収線量を表9-3に示す。

照射中に TLD-MSO-S 素子を異なった温度に保持するために、温度コントロール装置を製作した。この温度コントロール装置の本体は、セパレート型スケルトン構造のペルチェ素子(三興フリジスター事業部製)を4段カスケードにしたユニットと、ユニットの照射試料設置部を一定温度に保つコントローラーから成っている。ペルチェ素子ユニットは、ヒートパイプとファンによって放熱をさせる構造になっている。図9-10にペルチェ素子ユニットの外観を、表9-4に仕様を示す。

照射前に、図9-11に示すドシメータ・パッケージをペルチェ素子ユニット前面中央部に設置し、周囲を断熱材で覆った。表9-4の第2列に示したTLD-MSO-S素子の表面温度はKタイプ(クロメル・アルメル)熱電対プローブで計測した。本ペルチェ素子ユニットは、制御目標温度到達時間がきわめて早く安定している。例えば、ドシメータ・パッケージを装着する部分の室温から $-60^\circ\text{C}$ への到達時間は約8分である。重イオン照射は、ドシメータ・パッケージの温度が十分に安定してから行った。照射温度は、 $-60^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$ 、 $4^\circ\text{C}$ 、室温、 $37^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ に設定した。TLD-MSO-S素子の最低試験温度は、

軌道上の冷凍冷蔵庫の環境を模擬した-80℃であるが、ペルチェ素子ユニットの仕様上の最低温度が-60度であるため、-60℃で照射した試料は-80℃で、それ以外の照射試料は照射時と同じ温度で最大 500 日間まで保存しフェーディング特性データを取得した。測定結果と考察については 9.4.5 節に述べる。

表 9-3 フェーディング特性試験に使用した重イオン・ビーム。

核種	プライマリ・エネルギー	TLD 素子入射 LET	水等価吸収線量
H	160MeV	0.54keV/μm	10mGy
He	150MeV/n	2.24keV/μm	50mGy
C	290MeV/n	13.5 keV/μm	50mGy
Si	490MeV/n	57.9 keV/μm	50mGy
Fe	500MeV/n	204keV/μm	50mGy

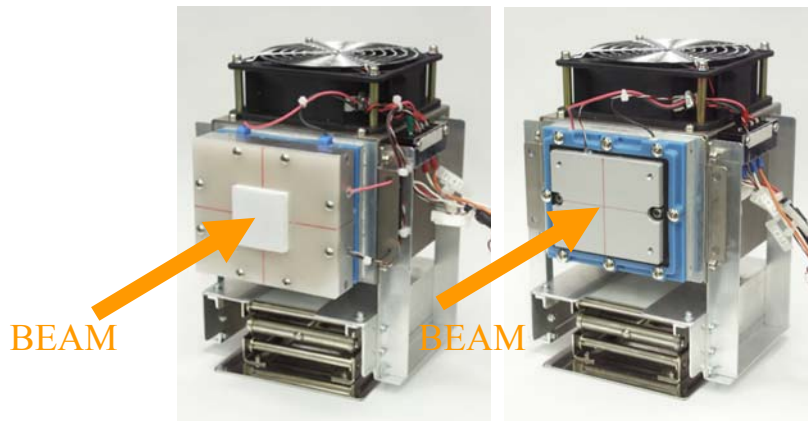


図 9-10 (左)-30度タイプのペルチェ素子ユニット、(右)+37度タイプのペルチェ素子ユニット。矢印の位置に照射試料を設置する。

表 9-4 ペルチェ素子ユニットとコントローラーの仕様。

制御温度	TLD温度	構造	サンプル装着部サイズ*	型番
-60℃	-54.5℃	カスケード(4段)	30 × 30 mm	ユニット:F77-HP コントローラー: 889-NFW
-20℃	-18.5℃	カスケード(2段)	40 × 40 mm	ユニット:F77-HP コントローラー: 889-NFW
+4℃	+4.0℃	単段	68 × 84 mm	ユニット:F77-HP コントローラー: 889-NF
+37℃	+36.8℃	単段	68 × 84 mm	ユニット:F77-HP コントローラー: 889-NF
+60℃	+58.9℃	単段	68 × 84 mm	ユニット:F77-HP コントローラー: 889-NF

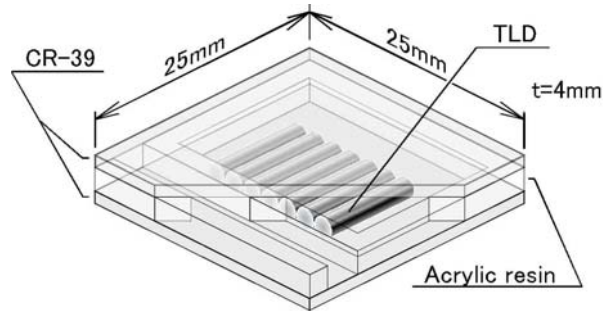


図 9-11 フェーディング特性試験に用いたドシメータ・パッケージ。

### 9.3.3.4 TLD-MSO-S素子の照射直後の熱蛍光特性測定実験

9.1節でTLD-MSO-S素子からの熱蛍光量は、照射直後に急激な初期変化が起こると述べた。これを調べるために、素子を陽子線 (155 MeV, 0.54 keV/μm, 10 mGy-water)で照射し、照射後30分、2時間、2日後に熱蛍光量の読み出しを行った。照射時の温度は、-60°C、-20°C、+4°C、室温、+37°C、+60°Cである。30分後に読み出した試料は読み出しまで室温で保管された。2時間後に読み出した試料の照射時/保管温度はそれぞれ、-60°C/-80°C、-20°C/0°C、+4°C/0°C、RT/RT、+37°C/RT、+60°C/RTであった。また、2日後に読み出した試料の照射時/保管温度はそれぞれ、-60°C/-80°C、-20°C/-20°C、+4°C/+4°C、RT/RT、+37°C/+37°C、+60°C/+60°Cであった。測定結果と考察については9.4.6節に述べる。

### 9.3.3.5 TLD-MSO-S素子のLET特性実験

TLDは、高LET領域で熱蛍光効率が減少することが知られている[44][73][74]。そこで、本研究でHIMAC加速器からの陽子線及び重イオン線をTLD-MSO-Sに照射して得たデータ及び11.1節で述べるICCHIBAN project実験[3, 4, 5, 6]で取得したデータを使ってTLD-MSO-Sの熱蛍光効率のLET依存性を調べた。照射と照射後の保管は室温で行い、照射2日後に熱蛍光量の読み出しを行った。測定結果と考察については9.4.7節に述べる。

### 9.3.3.6 TLD-MSO-S素子に対する陽子線入射角度依存性実験

TLDの形状に起因し、エックス線やガンマ線の素子に対する入射方向によって感度が変わることがわかっている[57]。そこで、PADLESで使用するTLD-MSO-S素子の熱蛍光量の粒子入射角度依存性を調べた。ISS軌道で吸収線量に主に寄与するのは、数百MeVの陽子であるので、155MeVの陽子(0.54keV/μm)を用いた。照射した線量は水等価吸収線量で10mGyである。測定結果と考察については9.4.8節に述べる。

### 9.3.3.7 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の校正実験

8.2節で述べたように、ハーツラスTD-1 プラスチックを用いて飛跡生成感度から入射粒子の $REL_{\omega_0=200eV}$ を求めるには両者の関係を表す校正曲線が必要である。さらに、ハーツラスTD-1 プラスチックの飛跡生成感度には入射伏角依存性があることがわかっているので、入射粒子に対するハ

ハーツラスTD-1プラスチック板の角度を変えて飛跡生成感度の変化を調べた。図9-12に照射に用いたアルミニウム製のサンプル・ホルダーを示す。照射は室温で行い、Cu板や生物照射室に設置してあるバイナリ・フィルターをエネルギー・デグレータとして用い、広いLET領域を測定した。測定結果と考察については9.4.9節及び9.4.10節に述べる。

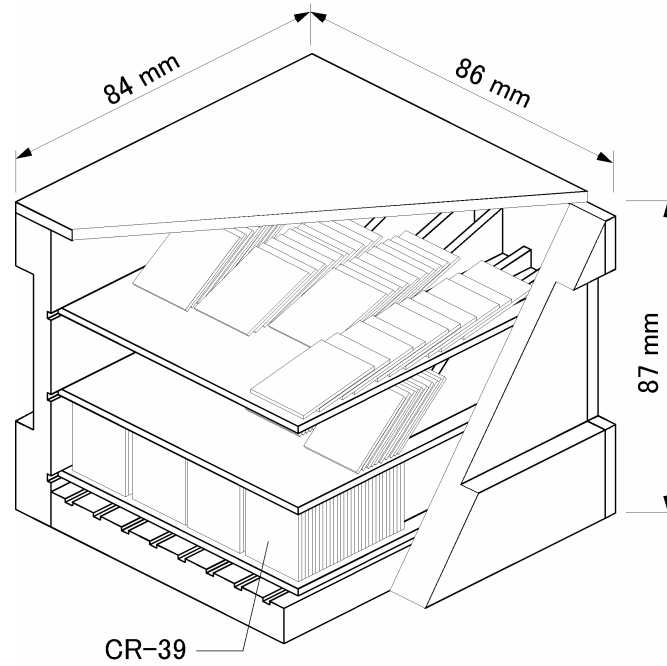


図9-12 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器照射用アルミニウム製サンプル・ホルダー。

### 9.3.3.8 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のフェーディング特性実験

ハーツラスTD-1 プラスチックについても、TLD-MSO-S素子と同様に照射・保存温度をパラメータとして180日までの飛跡生成感度の経時変化を調べた。温度を変えた照射方法は、9.3.3.3節で述べたものと同じである。CR-39プラスチック飛跡検出器のフェーディングやエージング特性を調べる研究には、 $^{252}\text{C}$ の核分裂中性子による反跳陽子のエッチピットで調べた実験がある[75]。しかし、ISS軌道上において、CR-39プラスチック飛跡検出器の測定対象と成るのは主として $10\text{keV}/\mu\text{m}$ 以上の陽子から鉄核までの重荷電粒子である。本測定では、C ( $290\text{MeV}/\text{n}$ ,  $13.3\text{keV}/\mu\text{m}$ ,  $10^3\text{ions}/\text{cm}^2$ )、Fe ( $500\text{MeV}/\text{n}$ ,  $203\text{keV}/\mu\text{m}$ ,  $10^3\text{ions}/\text{cm}^2$ )を照射して、ハーツラスTD-1プラスチックのフェーディング特性を調べた。照射時の温度は $-60^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$ 、 $4^\circ\text{C}$ 、室温、 $+37^\circ\text{C}$ 、 $+60^\circ\text{C}$ である。TLD-MSO-S素子の最高試験温度は $+60^\circ\text{C}$ であったが、ハーツラスTD-1プラスチックを $+60^\circ\text{C}$ で2ヶ月以上保管すると、プラスチックの非常に激しい劣化と褐変が見られた。そのため、 $+60^\circ\text{C}$ 保管のサンプルは180日までの計測実験が実施できなかった。また、最低試験温度については、9.3.3.3節に述べた理由により、 $-60^\circ\text{C}$ で照射した試料は $-80^\circ\text{C}$ で、それ以外の照射試料は照射時と同じ温度で最大180日間まで保存し、フェーディング特性データを取得した。測定結果と考察については9.4.11節に述べる。



### 9.3.3.9 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のエイジング特性実験

PADLES線量計に用いるプラスチック飛跡検出器(ハーツラスTD-1)のエイジング効果を調べるために、未照射の板を-80°Cから+45°Cの各温度条件で、保管開始期間をずらして2ヶ月、4ヶ月、6ヶ月間保存した試料を準備した。保存期間終了後、放射線医学総合研究所の重イオン加速器HIMAC生物照射室で、C(13.3keV/μm、10<sup>3</sup>ions/cm<sup>2</sup>)、Fe(203keV/μm、10<sup>3</sup>ions/cm<sup>2</sup>)を開始期間をずらして保管した全ての試料に同時に照射した。照射した試料は、同時に化学エッチングを行い、飛跡生成感度を計測した。測定結果と考察については9.4.12節に述べる。

### 9.3.3.10 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡生成感度の湿度影響実験と包装材の検討

PADLES線量計は、宇宙生物実験で様々な湿度環境(あるいは水中)に置かれることが予想される。ハーツラス TD-1 プラスチックの飛跡生成感度が湿度によって変化しないかどうか調べるとともに、適切な包装材を決定するための実験を行った。

まず、包装材として、ポリエチレン・バッグ(膜厚 37μm)とアルミ・シール・バック(膜厚 90μm、図9-13参照)の2種類の透湿性を調べた。あらかじめ重量を測定したシリカゲルをポリエチレン・バッグとアルミ・シール・バックに密閉し、以下の条件下で45日間保存した後、シリカゲルの重量を測定した。

- ① 乾燥空気中に保存(コントロール)。
- ② ポリエチレン・バッグに封入して、相対湿度90%以上の雰囲気中に保存。
- ③ アルミ・シール・バックに封入して、相対湿度90%以上の雰囲気中に保存。
- ④ ポリエチレン・バッグに封入して、水中に保存。
- ⑤ アルミ・シール・バックに封入して、水中に保存。

また、飛跡生成感度に対する湿度効果を調べるために、以下の条件で20日間保存したハーツラスTD-1板を、放医研HIMAC加速器で、Siイオン(490MeV/n)とFeイオン(500MeV/n)を照射し、その後エッチングして飛跡生成感度の変化を調べた。

- ① 乾燥空気中に保存(コントロール)。
- ② ポリエチレン・バッグに封入して、相対湿度90%以上の雰囲気中に保存。
- ③ 包装材無しで相対湿度90%以上の雰囲気中に保存。
- ④ アルミ・シール・バックに封入して、相対湿度90%以上の雰囲気中に保存。
- ⑤ 包装材無しで水中に保存。

測定結果と考察については9.4.13節に述べる。



図 9-13 アルミ・シール・バックの断面図。

### 9.3.3.11 アルミ・シール・バックに密封した PADLES 線量計の感度試験

9.4.13 節で述べるように、PADLES線量計は、ハーツラスTD-1 の照射雰囲気乾燥空気に保ち、かつ、TLD-MSO-S素子を紫外線から遮蔽するために、アルミ・シール・バックに密封することが望ましいという結論に至った。しかし、宇宙放射線に曝された場合、潜在飛跡の生成とともにハーツラスTD-1 プラスチックからはCO<sub>2</sub>等のガスが発生する。そこで、アルミ・シール・バックで密封した状態で長期間宇宙で使用した場合、線量測定結果にが変化しないかどうか<sup>137</sup>Csガンマ線源と<sup>252</sup>Cf中性子線源を使用して調べた。図 9-14 に照射体系の写真を示す。図中央に、<sup>137</sup>Csガンマ線源と<sup>252</sup>Cf中性子線源を置き、周囲にPADLES線量計(アルミ・シール・バックで密封した試料とアルミ・シール・バックに入れてあるが非密封の試料)をNo.1からNo.6の位置に設置した。線源から、PADLES線量計までの距離は 8cmで、この位置の<sup>137</sup>Csガンマ線源の線量率は 1.2mGy/day、中性子によって発生するエッチピット率は  $3 \times 10^2$ 個/cm<sup>2</sup>/dayであった。この状態で最大 45 日間照射したが、全エッチピット生成数はISS船内で 450 日照射して生成するエッチピット数に相当する。測定結果と考察については 9.4.14 節に述べる。

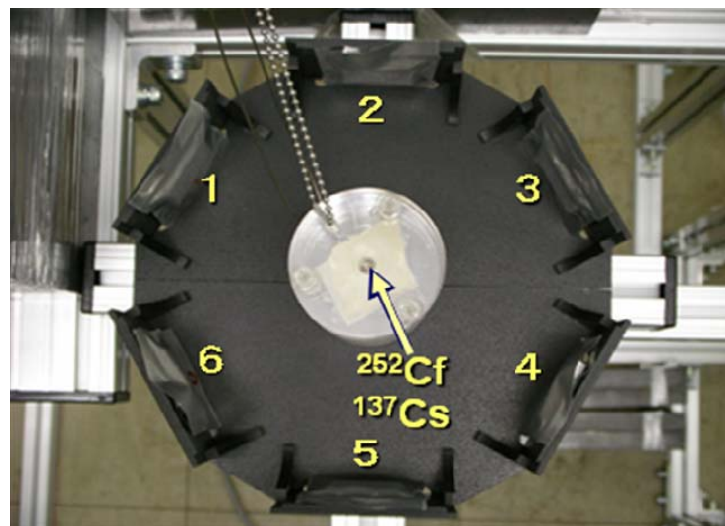


図 9-14 <sup>137</sup>Csガンマ線源と<sup>252</sup>Cf中性子線源を使用して照射体系の写真。

## 9.4 地上照射実験の測定結果と考察

### 9.4.1 TLD-MSO-S 素子の地上自然放射線に対する測定

図 9-15 に、JAXA 実験室で-80℃、室温、37℃に保管した TLD-MSO-S 素子のバックグラウンド線量の 200 日までの経時変化を示す。図 9-15 でわかるように、TLD-MSO-S 素子のバックグラウンド放射線による熱蛍光量(リーダー読み値)の増加は保存温度に依存する。これは熱蛍光量のフェーディング率が保存温度が高いほど大きいためと考えられる。従って、地上保管・輸送時は必ずフライト線量計と地上コントロール線量計を同時に、同位置・同温度にて移動させる必要があることがわかった。

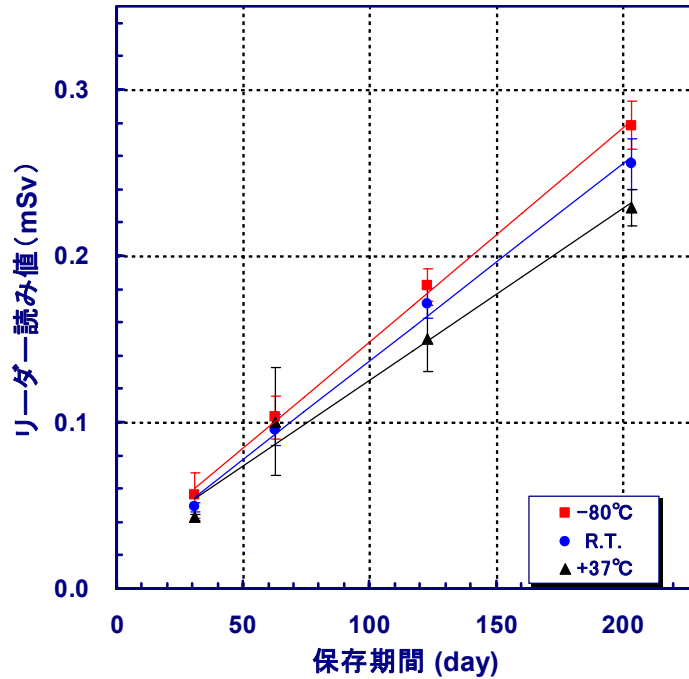


図 9-15 TLD-MSO-S 素子により計測した JAXA 実験室内におけるバックグラウンド線量。

#### 9.4.2 TLD-MSO-S 素子のガンマ線に対する応答

図 9-16 と図 9-17 に放射線計測協会の二次標準校正場で測定した $^{60}\text{Co}$ ガンマ線と $^{137}\text{Cs}$ ガンマ線に対する TLD-MSO-S 素子の線量応答を示す。図 9-16 と図 9-17 に示す測定データを直線でフィッティングし TLD リーダーの読み出し値から空気等価吸収線量を算出する校正定数  $K_{\text{air},\gamma}$  を求めた。空気等価校正定数から水等価校正定数  $K_{\text{water},\gamma}$  への変換は、空気と水に対する光子の質量エネルギー吸収係数 [76] の比を用いて行うことができる。 $^{60}\text{Co}$ ガンマ線と $^{137}\text{Cs}$ ガンマ線に対しては、 $K_{\text{water},\gamma}=1.11 \times K_{\text{air},\gamma}$  となる。結果として、 $K_{\text{water},\text{Co-60}}=1.218 \pm 0.018$ 、 $K_{\text{water},\text{Cs-137}}=1.279 \pm 0.021$  と求めた。

PADLES 線量計の信頼性を高めるため、あらかじめ選択した校正用素子を使って $^{60}\text{Co}$ ガンマ線照射を年 1 回以上行い、TLD リーダーの動作異常や校正定数に変化がないかどうか確認しているが、これまでのところ、TLD 読み出しシステムは大変安定しており、再校正の必要はなかった。

図 9-18 に JAXA が所有する 4 つの製造バッチ、合計約 2300 本の TLD-MSO-S 素子に $^{60}\text{Co}$ ガンマ線 100[mGy-air] を照射して得たデータを示す。図中のエラー・バーは  $3\sigma$  を表す。製造バッチ No.1 から No.3 までは、線量応答にばらつきはあるものの平均値は 100[mGy-air] に良く一致している。No.1 から No.3 までは、以前の製造者(極光)が製造したものであるが、バッチ No.4 は現在の製造者(化成オプトニクス)が製造したもので、この製造バッチの素子は線量応答が高い傾向にある。PADLES 線量計の精度を確保するため、宇宙実験用には、100[mGy-air] $\pm 5\%$  のものを選別して用いる。

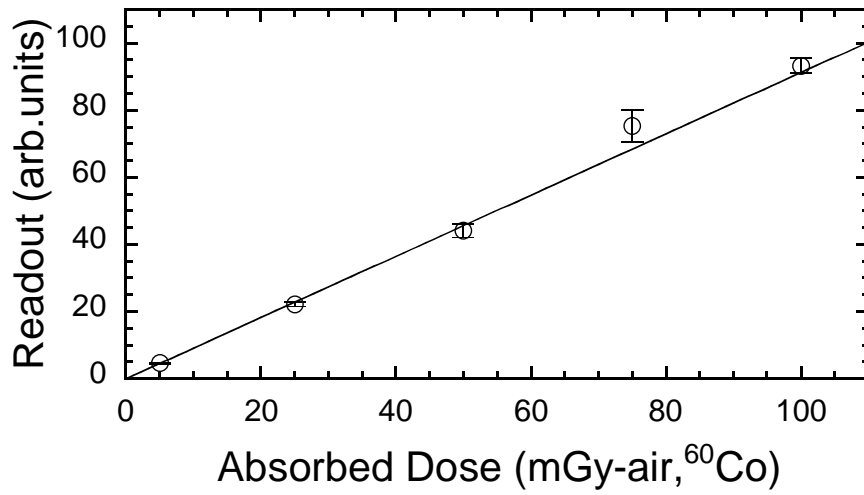


図 9-16 <sup>60</sup>Coガンマ線に対するTLD-MSO-Sの線量応答。

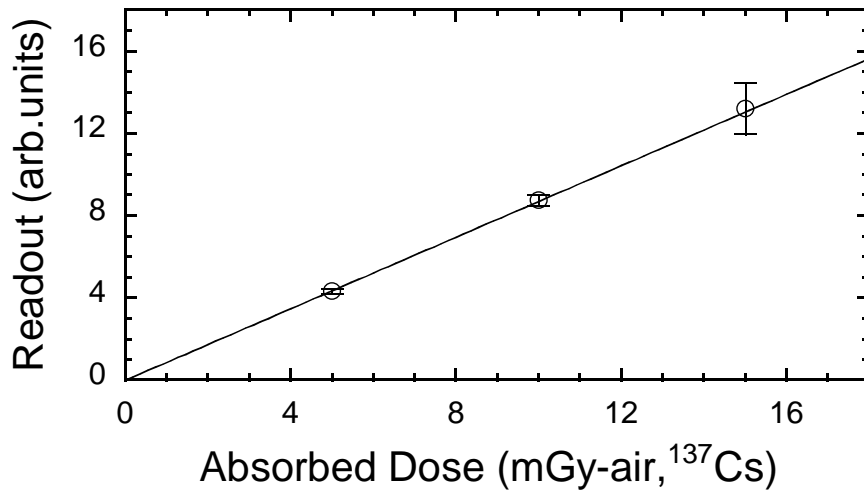


図 9-17 <sup>137</sup>Csガンマ線に対するTLD-MSO-Sの線量応答。

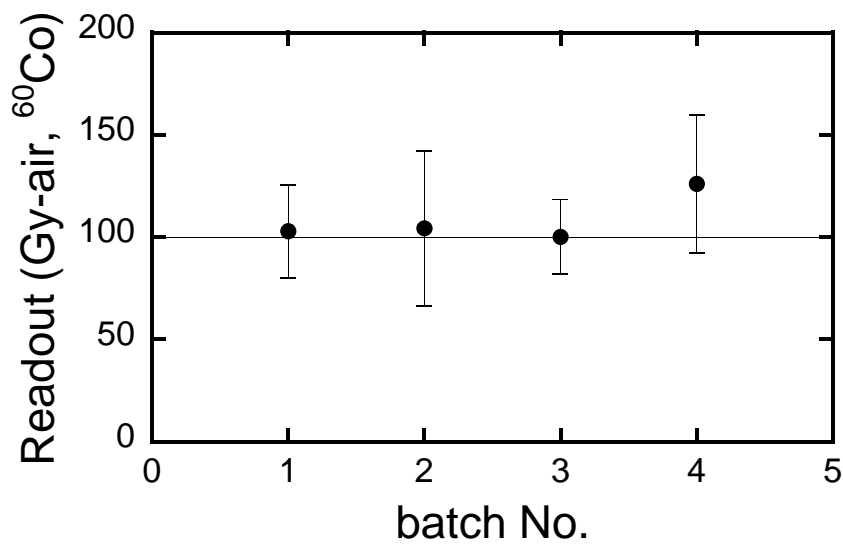


図 9-18 製造バッチ毎の TLD-MSO-S 素子の線量応答。

### 9.4.3 TLD-MSO-S素子の陽子線に対する線量応答

表 9-5 に実験で得られた測定値を示す。表のリーダー読み出し値はバックグラウンドを差し引いたものである。また、図 9-19 に、TLD-MSO-S素子の水等価吸収線量に対するリーダー読み出し値の変化を示す。本測定結果から、TLD-MSO-S素子は、高エネルギー陽子に対して 2Gyまで線量応答が線形であり、リーダー読み出し値を水等価吸収線量に換算するための校正定数 $K_{\text{proton}}$ は、 $1.253 \pm 0.015$ と求められた。

表 9-5 TLD-MSO-S 素子の陽子線に対する線量応答の測定結果。

N (Protons/cm <sup>2</sup> )	LET (keV/um)	吸収線量計算値 (mGy)	リーダー読み出し値 (uGy)	熱蛍光効率相対値 B/A
		A	B	
0	0	0	0	0.00
3.775E+06	5.351 E-01	3.24	4.047	1.25
1.826E+07	5.351 E-01	15.65	19.396	1.24
3.660E+07	5.351 E-01	31.38	39.836	1.27
5.462E+07	5.351 E-01	46.82	60.904	1.30
7.318E+07	5.351 E-01	62.73	78.876	1.26

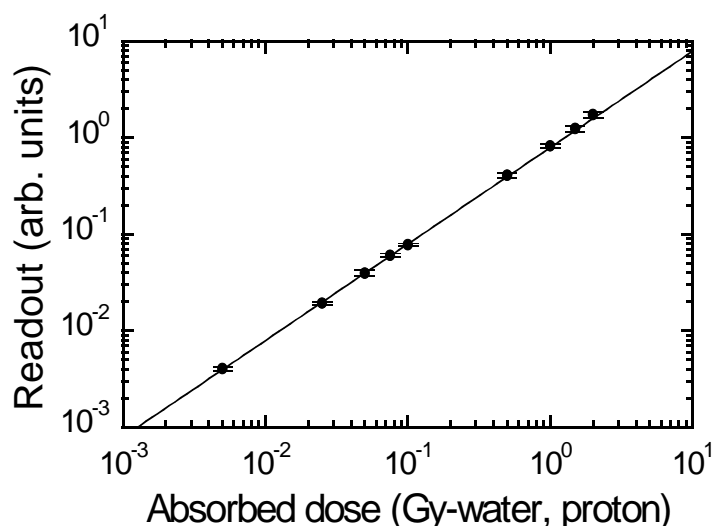


図 9-19 155MeV 陽子線照射に対する TLD-MSO-S 素子の熱蛍光量(リーダー読み出し値)と水等価吸収線量の相関。

### 9.4.4 TLD-MSO-S素子の重イオン線に対する線量応答

表 9-6 に重イオン照射実験で得られた測定値を示す。また、図 9-20 に、TLD-MSO-S 素子の水等価吸収線量に対する熱蛍光量(リーダー読み出し値)の変化を示す。本測定結果は、TLD-MSO-S 素子の線量応答が重荷電粒子線に対しても 100mGy までの範囲でほぼ線形であることを示し、本線量計素子を宇宙放射線計測に十分適用できることが確認できた。

表 9-6 TLD-MSO-S 素子の重荷電粒子に対する線量応答の測定結果。

TLDの線量応答																
ION種		Fe	Fe	Fe	Fe	Ar	Ar	Ar	Ar	C	C	C	C	Si	Si	Si
spil数		1	10		100	1	10		100	1	5	50				
イオン質量数		56	56	56	56	40	40	40	40	12	12	12	12	28	28	28
入射エネルギー	(MeV)	22941	22941	22941	22941	17717	17717	17717	17717	3288	3288	3288	3288	12536	12536	12536
	MeV/n	410	410	410	410	443	443	443	443	274	274	274	274	448	448	448
LET	MeV/(g/cm2)	2044.00	2044.00	2044.00	2040.00	944.10	944.10	944.10	944.00	134.60	134.60	134.60	134.60	579.20	579.20	579.20
	keV/um <sup>*</sup>	204.40	204.40	204.40	204.00	94.41	94.41	94.41	94.40	13.46	13.46	13.46	13.46	57.92	57.92	57.92
計測トラック数		434	1928	2914	4229	920	2675	8444	4058	1537	2353	4036	4346	2046	3865	5745
測定面積(cm2)		0.14	0.07	0.02	0.02	0.14	0.05	0.04	0.01	0.16	0.06	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01
トラック密度(/cm2)		3071	27288	122036	269344	6511	56790	215118	516906	9789	37465	514104	478964	43436	246161	487863
吸収線量mGy <sup>*</sup>	計算値	1.01	8.94	39.96	88.02	0.98	8.59	32.54	78.17	0.21	0.81	11.09	10.33	4.03	22.84	45.27
	標準偏差	0.05	0.20	0.74	1.35	0.03	0.17	0.35	1.23	0.01	0.02	0.17	0.16	0.09	0.37	0.60
リーダーの読み出し値 mSv	平均値	0.33	3.18	13.03	31.24	0.38	3.38	14.17	32.98	0.18	0.61	7.97	8.59	2.44	11.52	23.35
	標準偏差	0.03	0.20	1.23	1.51	0.02	0.26	0.80	2.26	0.01	0.04	0.56	0.24	0.10	0.92	0.85
蛍光効率相対値	読み値/計算値	0.33	0.36	0.33	0.35	0.39	0.39	0.44	0.42	0.87	0.76	0.72	0.83	0.60	0.50	0.52
	標準偏差	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.02

\*SRIM2000 計算コードによる計算値。

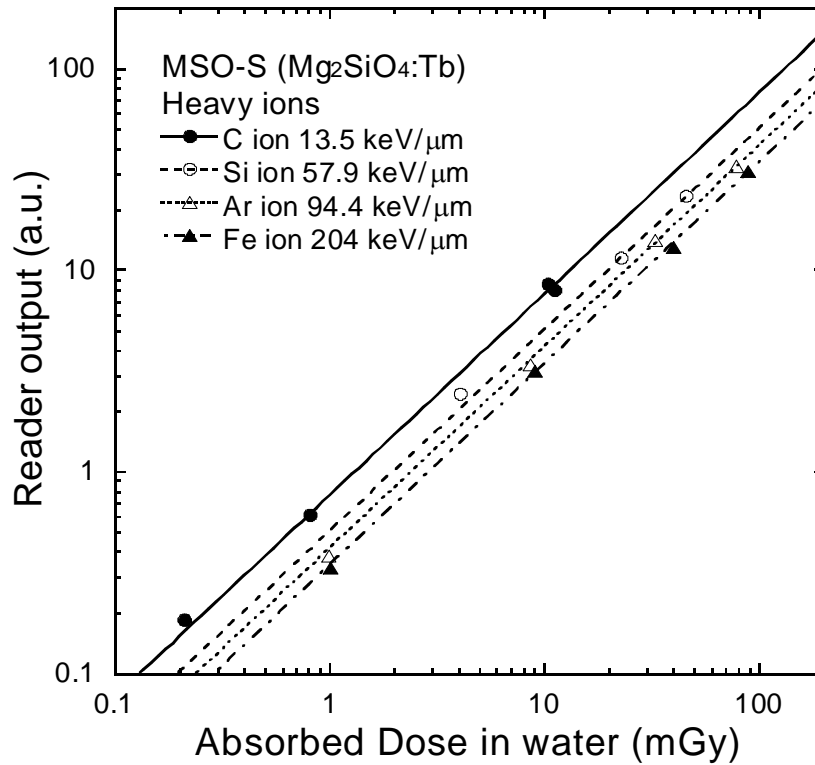


図 9-20 重イオン (274 MeV/n <sup>12</sup>C, 448 MeV/n <sup>28</sup>Si, 443 MeV/n <sup>40</sup>Ar, 410 MeV/n <sup>56</sup>Fe) 照射に対するTLD-MSO-S素子の熱蛍光量(リーダー読み出し値)と水等価吸収線量の相関。

#### 9.4.5 TLD-MSO-S素子の長期フェーディング特性

図 9-21 に、異なる温度で照射・保存した TLD-MSO-S 素子の熱蛍光効率 $\epsilon$ の経時変化を示す。図 9-21 の縦軸は、相対熱蛍光効率 $\zeta$ であり、次式で表される。

$$\zeta(T_1, T_2, t) = \frac{\epsilon(T_1, T_2, t)}{\epsilon(\text{RT}, \text{RT}, 2\text{days})}, \quad (9-2)$$

ここで  $T_1$  は照射温度,  $T_2$  は照射から熱蛍光量読み出しまでの保存温度,  $t$  は照射から熱蛍光量読み出しまでの保存期間である。また  $\epsilon(\text{RT}, \text{RT}, 2\text{days})$  は室温で照射・保管された素子を照射 2 日後に測定した熱蛍光効率である。

図 9-21 が示すように 4°C以下の低温ではフェーディングはほとんど起こらないことがわかった。+60°Cでのフェーディング率は大きい, この温度は参照試験として行ったもので、実際に ISS 生物実験ではこのような高温に PADLES 線量計が置かれることはない。

本研究では、図 9-21 のフェーディング・データを用いて 8.1 節の式(8-1)のフェーディング補正係数 $f_F$ を求めた。まず、図 9-21 の実験データを次式でフィッティングした。得られた係数 $a$ と $b$ を表 9-7 に示す。

$$\zeta(T_1, T_2, t) = a + b \text{Log}(t).$$

(9-3)

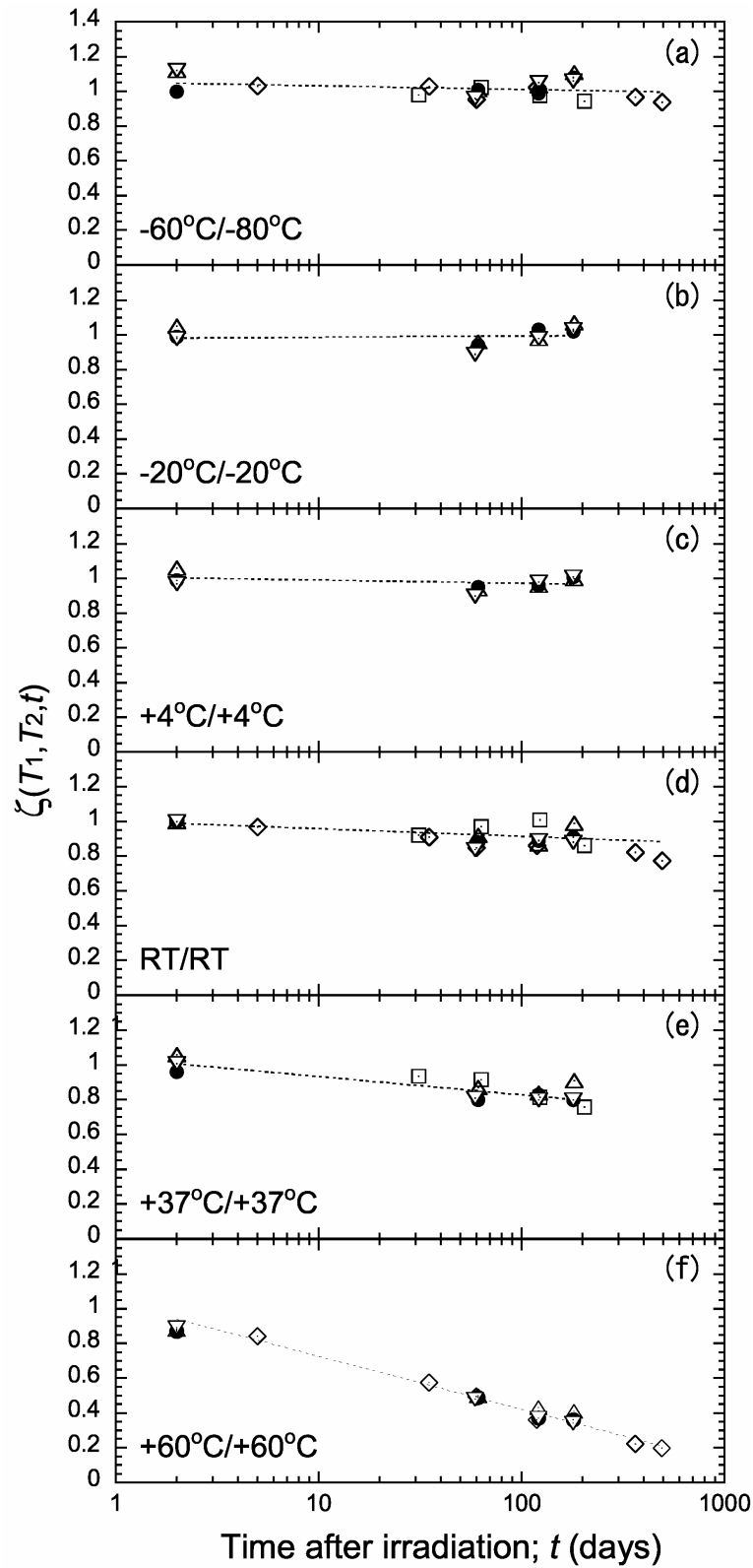


図 9-21 TLD-MSO-S 素子の各照射温度/保存温度における長期フェーディング特性: 0.54 keV/μm protons (●)、2.24 keV/μm He ions (△)、13.5 keV/μm C ions (◇)、57.9 keV/μm Si ions (□)、204



keV/ $\mu\text{m}$  Fe ions ( $\nabla$ )。点線は、データを式(9-3)でフィッティングした結果を示す。

表 9-7 フェーディング補正のための式(9-3)の係数 a と b。

$T_1$	$T_2$	a		b	
-60 °C	-80 °C	1.054	$\pm$ 0.034	-0.021	$\pm$ 0.018
-20 °C	-20 °C	0.981	$\pm$ 0.034	0.007	$\pm$ 0.018
+4 °C	+4 °C	1.010	$\pm$ 0.030	-0.018	$\pm$ 0.017
RT	RT	1.003	$\pm$ 0.030	-0.044	$\pm$ 0.015
+37 °C	+37 °C	1.040	$\pm$ 0.033	-0.105	$\pm$ 0.017
+60 °C	+60 °C	1.031	$\pm$ 0.025	-0.305	$\pm$ 0.011

$t_{\text{ex}}$ 日間連続的に照射され、照射開始から $t_{\text{st}}(\geq 2)$ 日後に測定される試料の、照射 2 日後の熱蛍光量を1としたときの相対熱蛍光効効率 $\xi$ は以下の式で表される。

$$\xi(T_1, T_2, t_{\text{ex}}, t_{\text{st}}) = \frac{\int_0^{t_{\text{ex}}} D(t) \zeta(T_1, T_2, t_{\text{st}} - t) dt}{\int_0^{t_{\text{ex}}} D(t) dt} \quad (9-4)$$

ここで $D(t)$ は、時間 $t(\leq t_{\text{ex}})$ における1日当たりの吸収線量率である。吸収線量率が照射期間中一定値 $D(t) = D_{\text{const}}$ ならば、式(9-4)は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \xi(T_1, T_2, t_{\text{ex}}, t_{\text{st}}) &= \frac{D_{\text{const}} \int_0^{t_{\text{ex}}} \zeta(T_1, T_2, t_{\text{st}} - t) dt}{D_{\text{const}} t_{\text{ex}}} \\ &= \frac{\int_0^{t_{\text{ex}}} \zeta(T_1, T_2, t_{\text{st}} - t) dt}{t_{\text{ex}}} \end{aligned} \quad (9-5)$$

式(9-3)を式(9-5)に代入して次式が得られる。

$$\begin{aligned} \xi(T_1, T_2, t_{\text{st}}, t_{\text{ex}}) &= a + \frac{b}{\ln 10} (\alpha \ln(t_{\text{st}}) + \ln(\beta) - \alpha \ln(\beta) - 1), \\ \alpha &= \frac{t_{\text{st}}}{t_{\text{ex}}}, \\ \beta &= t_{\text{st}} - t_{\text{ex}}. \end{aligned} \quad (9-6)$$

ここで、a、bは表 9-7 に示される係数である。式(8-1)のフェーディング補正係数 $f_{\text{F}}$ は、

$$f_{\text{F}}(T_1, T_2, t_{\text{st}}, t_{\text{ex}}) = \frac{1}{\xi(T_1, T_2, t_{\text{st}}, t_{\text{ex}})} \quad (9-7)$$

で求められる。PADLES線量計の宇宙搭載中の線量率が一定で搭載期間 6 ヶ月の間室温に置かれ、地上に帰還してからJAXA実験室まで室温で一ヶ月かけて輸送された後、熱蛍光量の読み出しを行ったと仮定すると、 $f_{\text{F}} = 1.095 \pm 0.031$ となる。

#### 9.4.6 TLD-MSO-S素子の照射直後の熱蛍光特性

図 9-22 に相対熱蛍光効率 $\zeta(T_1, T_2, t)$  の 2 日後までの変化を示す。照射 30 分後の熱蛍光効率は、照射時温度が低いほど熱蛍光効率が高い。2 時間後にはすべての照射温度に対して熱蛍光効率が増加した。しかし、照射 2 日後に測定した熱蛍光効率は、照射温度/保管温度が 37°C/37°C と 60°C/60°C の場合を除いてほぼ同じ値をとることがわかった。この熱蛍光効率の初期変化を考慮して、PADLES線量計に使用するTLD-MSO-S素子は、照射後 2 日以上置いてから、熱蛍光量の読み出しを行う。

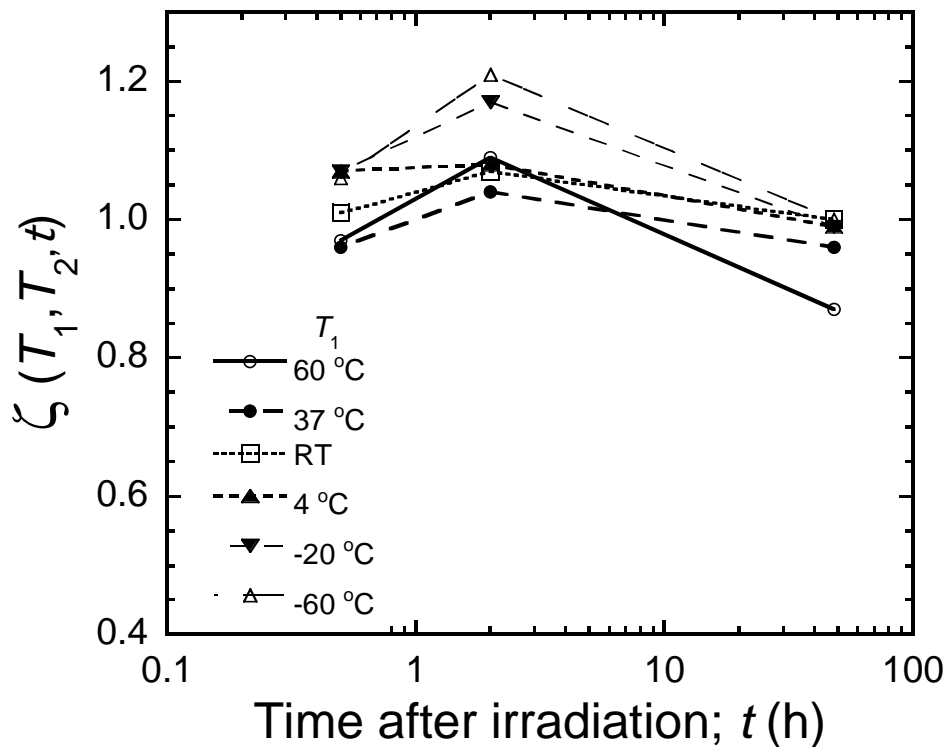


図 9-22 TLD-MSO-S 素子の照射直後の熱蛍光効率の変化。

#### 9.4.7 TLD-MSO-S 素子の LET 特性

使用したイオン種、LET、施設と 0.54keV/μm陽子に規格化した相対熱蛍光効率の測定結果を表 9-8 に示す。また、図 9-23 に、TLD-MSO-S素子の熱蛍光効率のLET依存性を示す。ただし、縦軸は155MeV陽子(0.54keV/μm)に対する応答を1として規格化してある。この図には<sup>60</sup>Coガンマ線及び<sup>137</sup>Csガンマ線に対する相対熱蛍光効率も示してあるが、本来ガンマ線に対してはLETを定義できないので0.2keV/μmにプロットしている。図 9-23 からわかるように、約 10keV/μm以上では熱蛍光効率が急激に減少する。本研究では、図 9-23 の実線及び点線で示すように、8.4 節の式(8-15)で用いる $F(L)$ を以下のように決定した。

$$\begin{aligned}
F(L) &= 1 & L \leq 10, \\
&= 1.476 - 0.464 \times \log_{10}(L) & 10 < L \leq 80, \\
&= 1.134 - 0.285 \times \log_{10}(L) & L > 80.
\end{aligned} \tag{9-8}$$

表 9-8 TLD-MSO-S 素子の LET 特性測定結果。

核種	LET <sub>∞</sub> (keV/μm-water)	0.54keV/μm 陽子に規格 化した相対熱蛍光効率	施設
<sup>1</sup> H <sup>1+</sup>	0.22	0.954 ± 0.074	NSRL <sup>I</sup>
	0.54	1.000 ± 0.015 <sup>DR</sup>	HIMAC
<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	2.20	1.148 ± 0.046	HIMAC <sup>I</sup>
	2.24	1.055 ± 0.059	HIMAC <sup>I</sup>
	2.25	1.071 ± 0.018 <sup>DR</sup>	HIMAC <sup>I</sup>
	10.1	0.994 ± 0.037	HIMAC <sup>I</sup>
<sup>12</sup> C <sup>6+</sup>	11.0	0.999 ± 0.075	HIMAC <sup>I</sup>
	11.2	0.964 ± 0.017 <sup>DR</sup>	HIMAC <sup>I</sup>
	13.5	1.016 ± 0.023 <sup>DR</sup>	HIMAC
	19.8	0.971 ± 0.043	HIMAC <sup>I</sup>
	24.4	0.810 ± 0.015	HIMAC <sup>I</sup>
	27.5	0.663 ± 0.038	HIMAC
	13.8	1.008 ± 0.049	NSRL <sup>I</sup>
<sup>16</sup> O <sup>8+</sup>	31.0	0.805 ± 0.040	HIMAC <sup>I</sup>
<sup>20</sup> Ne <sup>10+</sup>	56.5	0.659 ± 0.011 <sup>DR</sup>	HIMAC <sup>I</sup>
<sup>28</sup> Si <sup>14+</sup>	57.9	0.677 ± 0.018 <sup>DR</sup>	HIMAC
	57.9	0.645 ± 0.024	HIMAC
	75.6	0.636 ± 0.034	HIMAC
	89.3	0.622 ± 0.043	HIMAC <sup>I</sup>
<sup>40</sup> Ar <sup>18+</sup>	93.9	0.573 ± 0.014	HIMAC <sup>I</sup>
	94.4	0.513 ± 0.017 <sup>DR</sup>	HIMAC
	94.4	0.552 ± 0.022	HIMAC
	119	0.518 ± 0.022	HIMAC
	146	0.507 ± 0.022	NSRL <sup>I</sup>
<sup>56</sup> Fe <sup>26+</sup>	190	0.476 ± 0.061	HIMAC <sup>I</sup>
	202	0.480 ± 0.023	HIMAC
	203	0.518 ± 0.011 <sup>DR</sup>	HIMAC <sup>I</sup>
	204	0.436 ± 0.015 <sup>DR</sup>	HIMAC
	392	0.363 ± 0.029	HIMAC
	438	0.371 ± 0.025	HIMAC
	535	0.381 ± 0.022	HIMAC
	674	0.355 ± 0.020	HIMAC
2300	0.156 ± 0.010	HIMAC	
<sup>84</sup> Kr <sup>36+</sup>	541	0.445 ± 0.014	HIMAC <sup>I</sup>

<sup>I</sup> ICCHIBAN project 実験[3、4、5、6]で取得したデータ。

DR 線量特性から計算したデータ。

NSRL: the NASA Space Radiation Laboratory (NSRL) at Brookhaven National Laboratory。

本研究では、高エネルギー重荷電粒子のデータから $F(L)$ を決定した。しかし、Horowitz等がまとめたLiF:Mg, Ti 熱蛍光体のLET依存性データ[77]をみると、熱蛍光効率はLETだけではなく重荷電粒子のZにも依存し、低Zの粒子に対する熱蛍光効率は、同じLETを持つ高Zの熱蛍光効率より低くなっている。もし、同様の傾向がTLD-MSO-S (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Tb熱蛍光体)にもあるとすると、本研究で求めた $F(L)$ は、8.4 節の式(8-15)で与えられる $\kappa$ の最大値を与えることになる。これを考慮して、ここで、 $\kappa$ が吸収線量や線量当量に与える系統的誤差をおおまかに考察する。もし、10keV/μm以上

で  $F(L)=0$  と仮定すると、 $\kappa = 0$  となる。この場合、PADLES線量計がこれまで測定したISS船内でのデータから推定すると、吸収線量と線量当量を数%程度の過小評価となる。

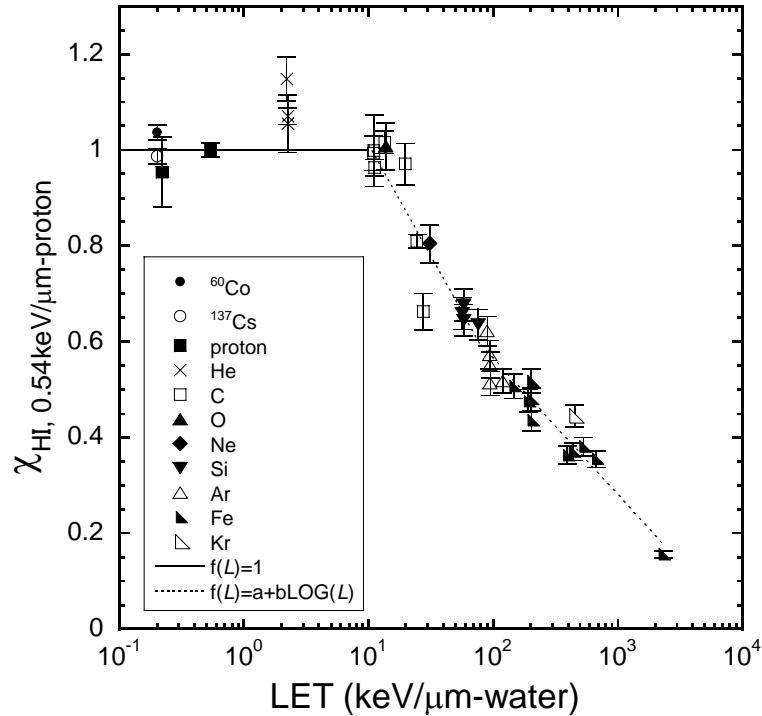


図 9-23 TLD-MSO-S 素子の LET 特性。

#### 9.4.8 TLD-MSO-S 素子に対する陽子線入射角度依存性

図 9-24 に陽子線入射角度  $0^\circ$  から  $90^\circ$  までの熱蛍光量効率 (相対値) を示す。測定の結果、TLD-MSO-S 素子には高エネルギー陽子に対して有意な角度依存性がないことがわかった。従って、本研究では、8.1 節式(8-1)の  $f_\theta$  を 1 と置くことにした。

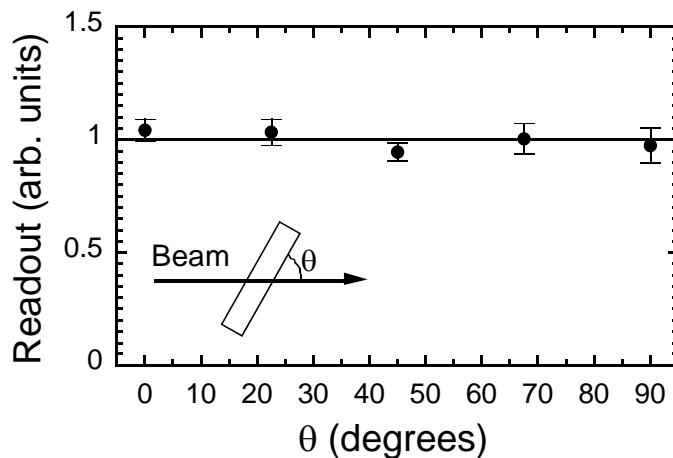


図 9-24 155MeV 陽子 0.54keV/ $\mu m$ 、10mGy を TLD-MSO-S 素子に対して  $0^\circ$  から  $90^\circ$  の入射

角度 $\theta$ で照射した際の相対熱蛍光効率。縦軸は  $90^\circ$ 入射に対する熱蛍光効率に対する相対値である。

#### 9.4.9 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の校正曲線

図 9-25 に入射伏角が  $80^\circ \sim 90^\circ$  の範囲をとる重イオンに対する飛跡生成感度のデータを示す。これらのデータのうち、LET が  $50 \text{ keV}/\mu\text{m-water}$  以上の飛跡生成感度は、ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器を 5.5 時間エッチングして求めたものであり、LET が  $50 \text{ keV}/\mu\text{m-water}$  以下の飛跡生成感度は、ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器を 13.5 時間エッチングして求めたものである。図 9-25 のデータを 6 次の多項式でフィッティングして図中の点線で示す校正曲線を得た。本論文の第 12 章で述べる宇宙放射線計測では、この校正曲線を用いた。

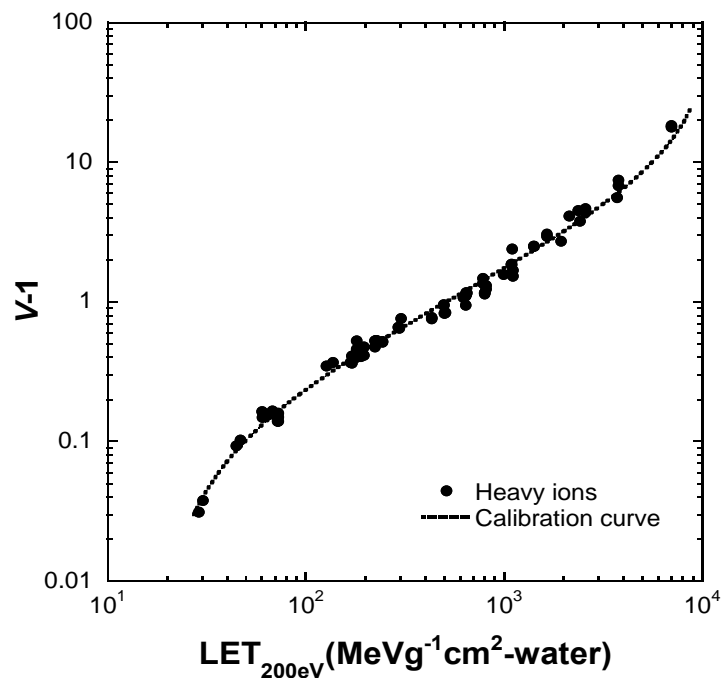


図 9-25 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の校正曲線。

#### 9.4.10 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の飛跡生成感度の入射伏角依存性

図 9-26 に飛跡生成感度の入射伏角依存性の測定結果を示す。入射粒子の LET 範囲が 10 から  $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$  の範囲では、粒子の入射伏角が小さくなるにつれて飛跡生成感度が低くなった。特に LET が  $13.4 \text{ keV}/\mu\text{m-water}$  の粒子に対する飛跡生成感度は、 $78^\circ$ 以下で急激に低下した。LET が 100 から  $200 \text{ keV}/\mu\text{m-water}$  の範囲では、飛跡生成感度は、粒子の入射伏角に依存せずほぼ一定の値を示した。逆に、LET が  $200 \text{ keV}/\mu\text{m-water}$  以上では、粒子の入射伏角が小さくなるにつれて飛跡生成感度が高くなる傾向を示した。過去の実験でも同様の結果が得られている [39]。

ここで、8.2 節で述べた  $\eta(L)$  を考察する。図 9-26 において、各 LET の粒子の  $\theta=90^\circ$  における飛跡生成感度から予想される臨界角  $\theta_c$  を  $\delta(L)$  と置く。また、各 LET の粒子の飛跡生成感度実測値が、臨

界角  $\theta_c$  で決まる飛跡生成感度最小値 (図 9-27 中の実線) と交差する角度を  $\delta_i(L)$  とすると、 $\eta(L)$  は次式で与えられる[39]。

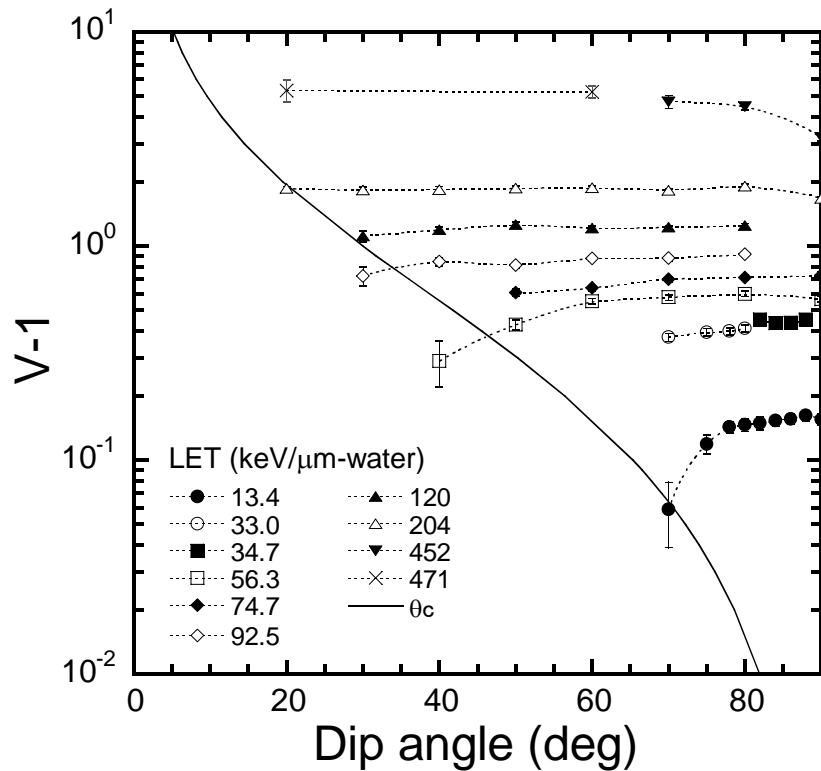


図 9-26 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の飛跡生成感度の入射伏角依存性。

$$\eta(L) = \frac{1 - \cos(2\delta_i(L))}{1 - \cos(2\delta_r(L))}. \quad (9-9)$$

図 9-27 に本研究で得られた  $\eta(L)$  の実測値を黒丸で示す。本研究では、これらのデータ点を次式でフィッティングした。

$$\eta(L) = C_{\eta 0} + \frac{C_{\eta 1}}{L}. \quad (9-10)$$

結果として、 $C_{\eta 0}=0.933$ 、 $C_{\eta 1}=19.17$  と得られた。本論文の第 12 章で述べる宇宙放射線計測では、前節で述べた校正曲線と上述した  $\eta(L)$  の結果を用いて LET 分布の評価を行った。

しかし 8.2 節で述べたように、ハーツラス TD-1 プラスチックに垂直入射した粒子を用いて評価した校正曲線と、前述の  $\eta(L)$  で補正した検出効率を組み合わせると LET 分布の評価すると系統的な誤差を生じる要因となる。特に数十 keV/μm 以下の低 LET 領域で入射伏角の小さな粒子の LET を過小評価することになる。そこで、今後の宇宙放射線計測では、この系統的誤差を避けるために、飛跡生成感度が一定値を取る伏角範囲の粒子のみを LET 分布評価の測定対象とすることを検討している。具体的には、8.2 節で述べたように、式(8-4)式の  $\theta_{\text{cutoff}}$  を以下のように設定する。

LRP試料:  $\theta_{\text{cutoff}} = 80^\circ$  ( $\text{LET} \leq 50 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ),

SRP試料:  $\theta_{\text{cutoff}} = 60^\circ$  ( $\text{LET} > 50 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ).

ただし、伏角範囲を制限する方法には、統計誤差を小さくするために広い面積をスキャンして、より多くのエッチピットを観測しなければならないという欠点がある。第 10 章に述べたようにハードウェアやソフトウェアなどの開発・整備によって CR-39 プラスチック飛跡検出器の解析時間は大幅に短縮されたが、ゴミや傷等の除去は未だ人の目視に頼らねばならず、解析するエッチピット数の増加は解析時間の増加につながる。今後の宇宙実験で蓄積されるデータを基に LET 分布の精度を低下させずに測定時間を短縮するための方法を検討していく必要がある。

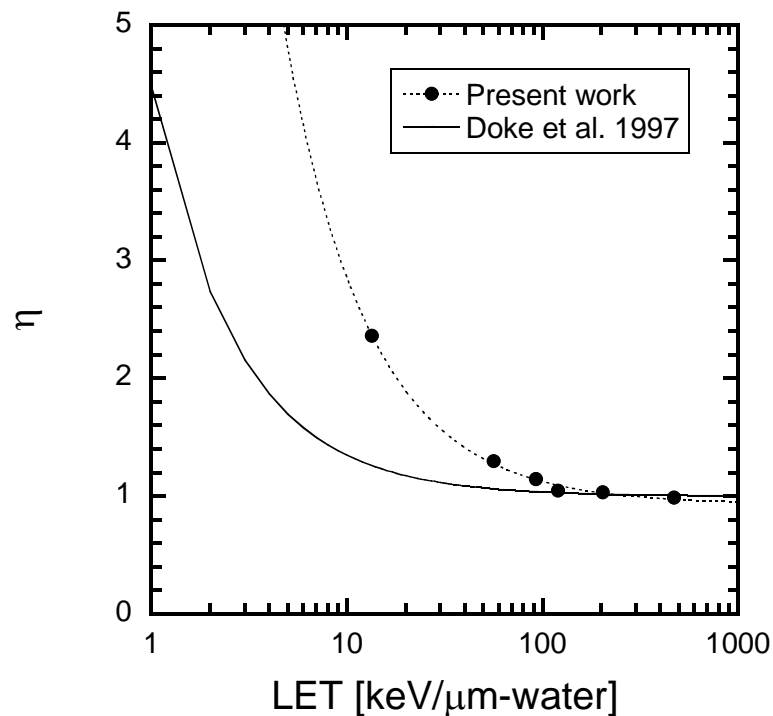


図 9-27 LET に対する関数として与えられる補正係数  $\eta$ 。

#### 9.4.11 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のフェーディング特性

図 9-28 に低LET粒子 (C,  $13.3 \text{ keV}/\mu\text{m}$ )、図 9-29 に高LET粒子 (Fe,  $203 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) のトラック・エッチ率  $V_T$  と飛跡生成感度  $V_1$  の経時変化を示す。ハーツラス TD-1 プラスチックにおいては、低LET粒子 (C,  $13.3 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) と高LET粒子 (Fe,  $203 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) とではトラック・エッチ率  $V_T$  と飛跡生成感度  $V_1$  の経時変化の挙動が異なった。低LET粒子に対する  $V_T$  は  $37^\circ\text{C}$  以下では温度によらず 180 日までほぼ一定であった。高LET粒子に対する  $V_T$  は、 $-80^\circ\text{C}$  から  $4^\circ\text{C}$  までの低温領域では保存期間が長くなるにつれて  $V_T$  の増加が見られ、室温、 $+37^\circ\text{C}$  では  $V_T$  の変化がほとんどなかった。また、9.3.3.8 節で述べたように、2ヶ月以降の  $+60^\circ\text{C}$  照射保管の場合は、エッチング後の表面の荒れが目立ちエッチピットの検出が困難であったため、計測できなかった。

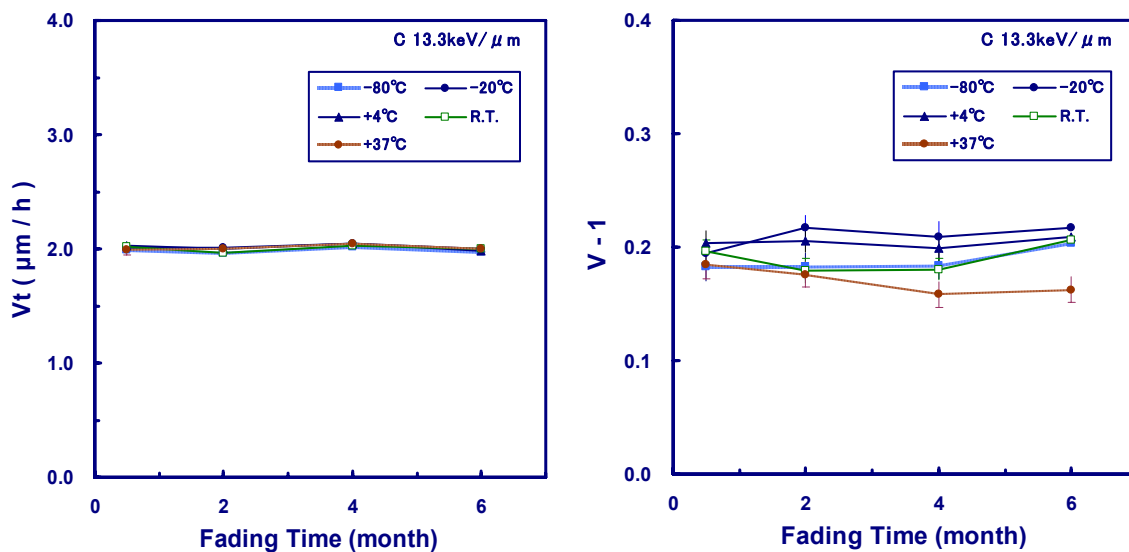


図 9-28 ハーツラスTD-1 プラスチックのC(13.3keV/ $\mu\text{m}$ )に対するトラック・エッチ率  $V_t$ (左)と飛跡生成感度  $V-1$ (右)の経時変化。

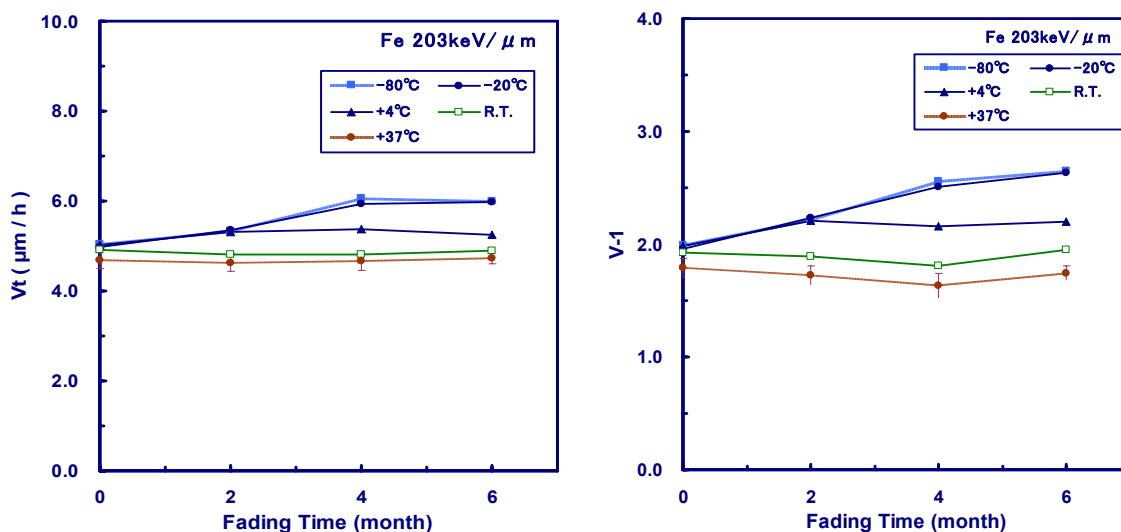


図 9-29 ハーツラスTD-1 プラスチックのFe(203keV/ $\mu\text{m}$ )に対するトラック・エッチ率  $V_t$ (左)と飛跡生成感度  $V-1$ (右)の経時変化。

飛跡生成感度は  $V_t$  の  $V_B$  に対する比として定義される量であるので、 $V_B$  の経時変化も感度に大きく影響する。そこで  $V_B$  の経時変化も測定した。図 9-30 は、 $-80^\circ\text{C}$  から  $+45^\circ\text{C}$  に保存したハーツラス TD-1 プラスチック板 (未照射) の  $V_B$  の経時変化を測定した結果である。エッチング前後の板厚の差を測定して  $V_B$  を決定した。 $V_B$  は、 $-80^\circ\text{C}$  から  $+37^\circ\text{C}$  の温度範囲では 180 日までほぼ一定であったが、 $+45^\circ\text{C}$  では保存期間とともに顕著な増加が見られた。



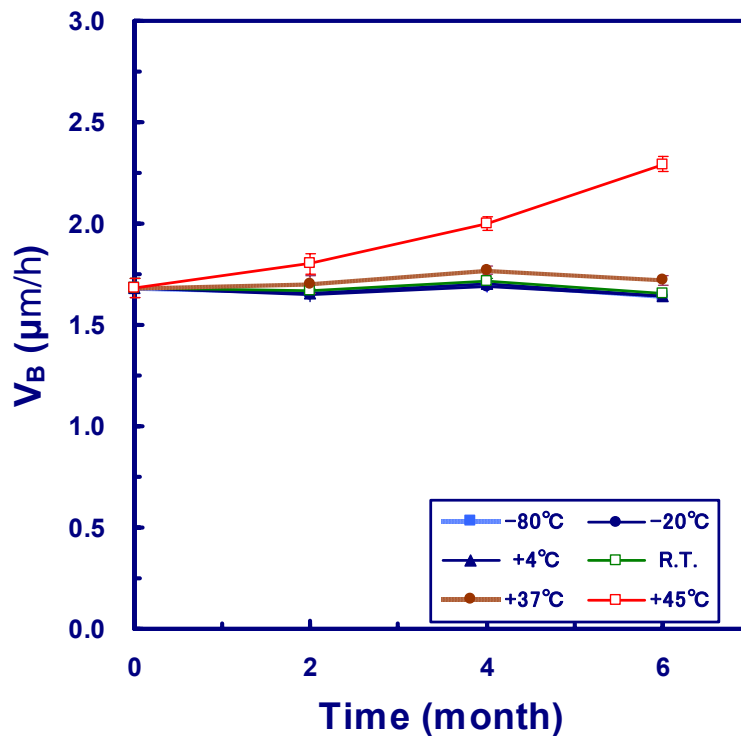


図 9-30 ハーツラスTD-1 プラスチックの保管温度をパラメータとしたバルク・エッチ率  $V_B$  の経時変化。未照射試料で測定した。

CR-39 プラスチック飛跡検出器やポリカーボネートでは、飛跡生成感度  $V_1$  が重荷電粒子入射時の検出器の温度に依存することが知られている。これはRegistration Temperature Effect (RTE) と呼ばれている。RTEは入射粒子のLETが高いほど大きく、飛跡に沿った電離密度が同じであれば、電荷Zの大きい入射粒子のほうが大きくなるという報告もある[78]。そこで、本研究では照射後数日以内にエッチングした試料で、飛跡生成感度の照射温度に対する依存性を調べた。図 9-31 に示すように、ハーツラスTD-1 プラスチックの飛跡生成感度は低温ではほぼ一定値を取るが、37°C以上では低下するという結果が得られた。

本測定の結果から、照射温度や照射後の温度・保存期間に依存してハーツラスTD-1 プラスチックの感度に変化する場合があることがわかった。しかし、ハーツラスTD-1 プラスチックのフェーディング特性については、今後さらに詳細なデータを取得する必要がある。特に、高LET粒子に対する  $V_T$ 、 $V_1$  の低温での増加については、再度照射実験を実施し確認することが望ましいと考える。

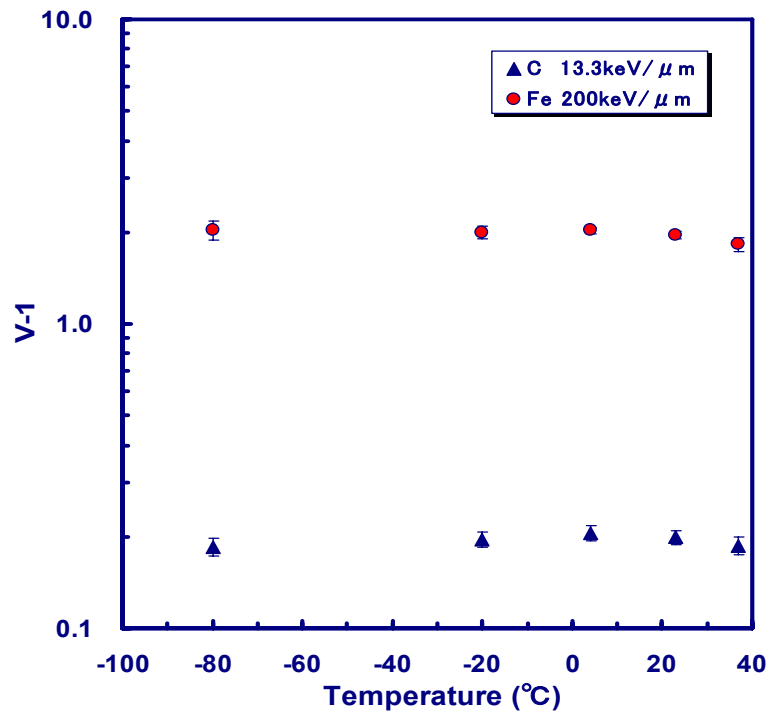


図 9-31 照射時温度に対するハーツラス TD-1 プラスチックの飛跡生成感度の変化。

#### 9.4.12 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のエージング特性

-80°Cから+45°Cに保存したハーツラスTD-1 プラスチック板のバルク・エッチ率  $V_B$  と飛跡生成感度  $V-1$  の経時変化を、低LET粒子 (C、13.3keV/μm) について図 9-32 に、高LET粒子 (Fe、203keV/μm) について図 9-33 に示す。本測定の結果、ハーツラスTD-1 プラスチックはエージング効果により特に低LET粒子の飛跡生成感度が劣化することがわかった。エージングによる飛跡生成感度の劣化をできるだけ抑えるために、PADLES線量計素子として使用するハーツラスTD-1 プラスチック板は、メーカーからの納入直後から使用時まで、-80°Cの冷凍庫で保管される。しかし、エージング効果による低LET粒子の飛跡生成感度が低下することが本当ならば、製造日から時間のたったハーツラスTD-1 プラスチック板については、再校正が必要であると考えられる。

前節及び本節で述べたように、ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のフェーディング及びエージング特性は、入射粒子の LET、照射・保管時の温度、保存期間等に依存する。現時点の PADLES 線量計から線量算出には、ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のフェーディング、エージングの効果の補正は行っていない。しかし、これらの効果の吸収線量に対する影響は、37°C以下の温度領域であれば数%以下と予測される。実際に ISS に搭載するドシメータ・パッケージには、既知の LET の重イオンを照射した参照用試料が含まれており、これを用いて飛跡生成感度のフェーディング効果の確認を行う。

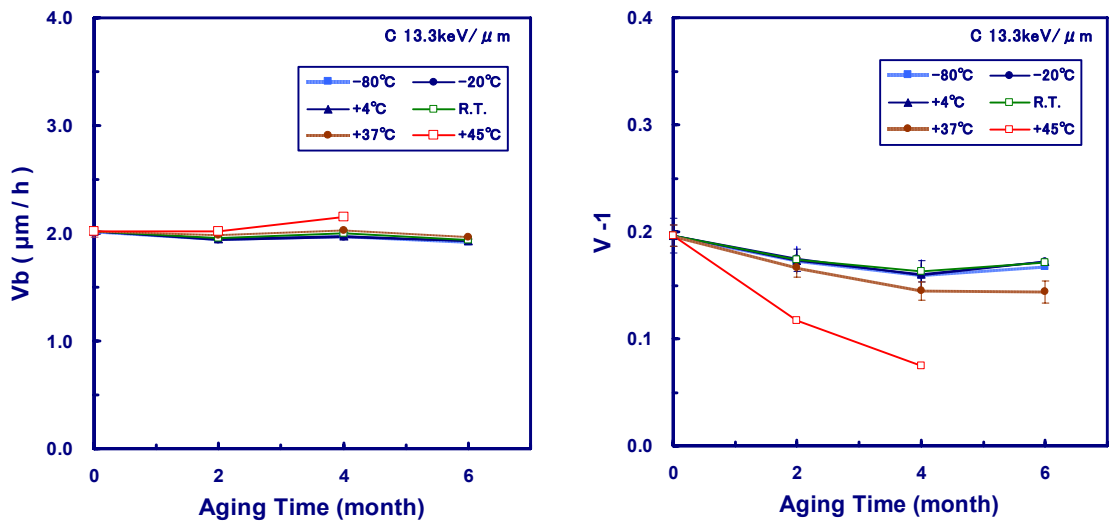


図 9-32 エージング時間に対するハーツラスTD-1 プラスチックのCイオン(13.3keV/ $\mu\text{m}$ )に対するバルク・エッチ率  $V_B$ と飛跡生成感度  $V^{-1}$  の経時変化。

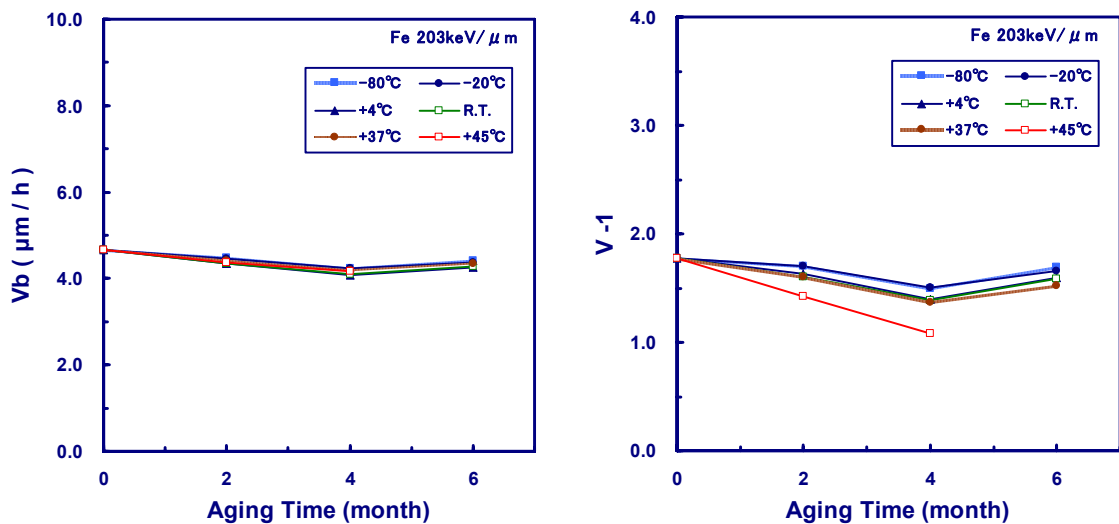


図 9-33 エージング時間に対するハーツラスTD-1 プラスチックの下: Fe(203keV/ $\mu\text{m}$ )に対するバルク・エッチ率  $V_B$ と飛跡生成感度  $V^{-1}$  の経時変化。

#### 9.4.13 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の湿度に対する影響

図 9-34 に、ポリエチレン・バッグとアルミ・シール・バックの透湿試験の結果を示す。アルミ・シール・バックの透湿率は 45 日間水中においた場合でも  $0\text{mg}/\text{cm}^2/\text{day}$ であり、対してポリエチレン・バッグの透湿率は水中においた場合で  $0.27\text{mg}/\text{cm}^2/\text{day}$ であった。結果として、アルミ・シール・バックは、ポリエチレン・バッグに比べ優れた防湿効果を示すことが確認された。また、アルミ・シール・バックは遮光性もあるため、TLD-MSO-S素子に対しても紫外線を遮蔽するという特長を持つ。

図 9-35 に、ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の飛跡生成感度に対する湿度効果を示す。結果は、高湿度(相対湿度 $>90\%$ )雰囲気、あるいは水中に長時間おかれた試料の飛跡生成感度は、

乾燥空気中に置かれた試料に比べ、Si イオンと Fe イオンの感度が約 20%低下することがわかった。

以上の結果から、PADLES 線量計は、乾燥空気とともにアルミ・シール・バックで密封して使用することが望ましいという結論に達した。

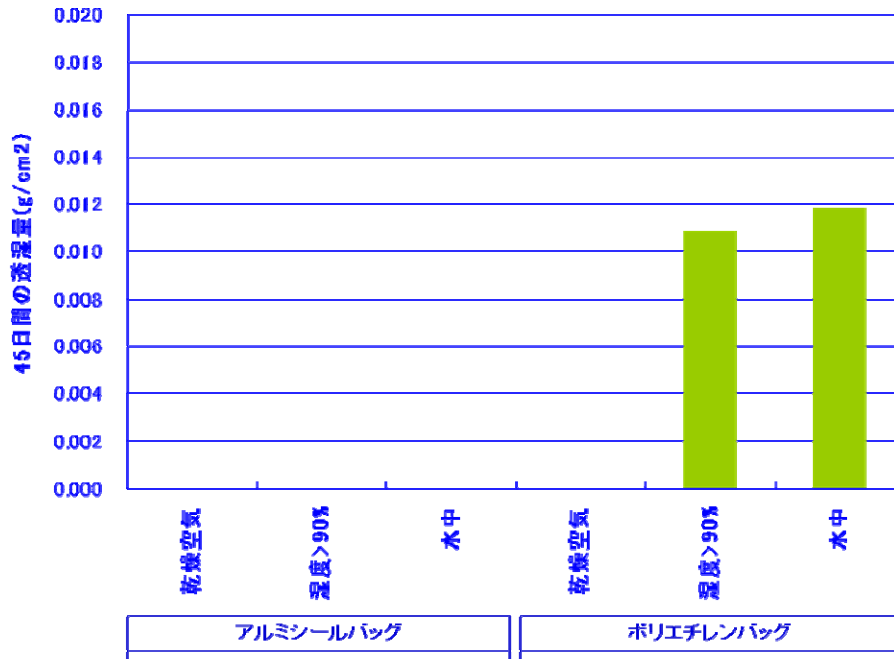


図 9-34 ポリエチレン・バッグとアルミ・シール・バックの透湿試験。

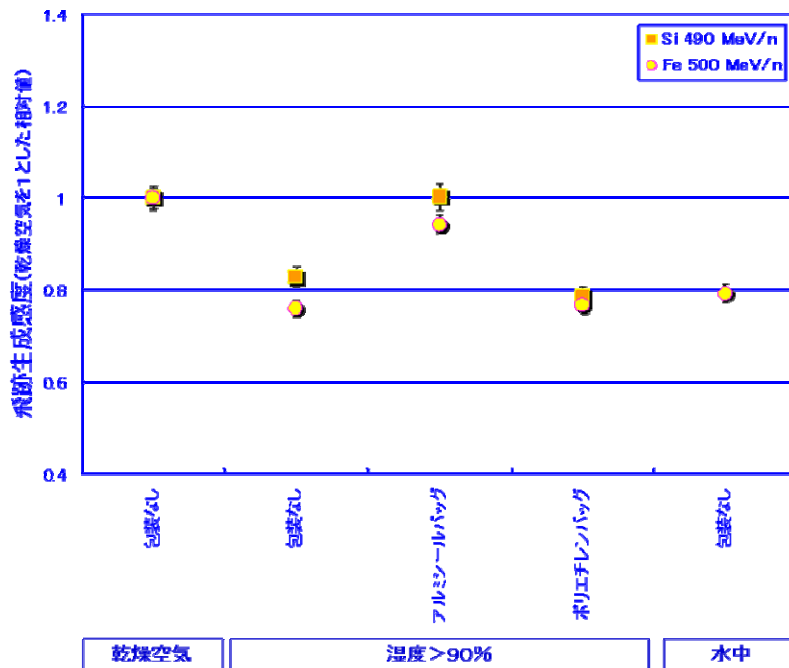


図 9-35 ハーツラス TD-1 プラスチックの飛跡生成感度に対する湿度効果。

#### 9.4.14 アルミ・シール・バックに密封した PADLES 線量計の応答

前節で述べたように、PADLES線量計は、ハーツラスTD-1 プラスチックの照射雰囲気を乾燥空気に保ち、かつ、TLD-MSO-S素子を紫外線から遮蔽するために、アルミ・シール・バックに密封することが望ましいという結論に至った。しかし、宇宙放射線に曝された場合、潜在飛跡の生成とともにハーツラスTD-1 プラスチックからはCO<sub>2</sub>等のガスが発生し、これがハーツラスTD-1 プラスチックの飛跡生成感度に影響を与えないかということが懸念された。しかし、<sup>137</sup>Csガンマ線源と<sup>252</sup>Cf中性子線源を用いて、アルミ・シール・バックで密封したPADLES線量計とアルミ・シール・バックに入れてあるが非密封のPADLES線量計を照射した結果、ISS船内で450日照射して生成するエッチピット数に相当する線量を照射しても、TLD-MSO-S素子とハーツラスTD-1 プラスチックのデータを組み合わせて算出した吸収線量は誤差の範囲内で一致し、線量結果に影響を与えないことが確認された。

## 第10章 PADLES 線量計測用ソフトウェアの開発

### 10.1 概要

本研究では、PADLES 線量計の搭載前準備及び ISS 帰還後の解析から線量算出までに必要な2つのソフトウェア“TLD PADLES”と“AUTO PADLES”を開発した。ISS における宇宙生物実験では、宇宙から帰還後の生物試料の被ばく線量や線質の情報を生物研究者ができるだけ迅速に入手できる必要がある。そこで、PADLES 線量計の帰還後から線量算出までの期間を2週間以内とすることを目標に、帰還後の素子の解析から線量算出までの手順を細かく検討しハードウェア及び本章で述べるソフトウェアの開発・整備を行った。図 10-1 に PADLES 線量計の準備から帰還後の解析までの手順を示す。

### 10.2 TLD PADLES

TLD PADLES は、TLD-MSO-S 素子の個別データを管理するためのソフトウェアである。TLD PADLES には、現在、約 2500 本の素子について、個々の素子の素子番号、製造バッチ番号、ガンマ線や重荷電粒子に対する水等価吸収線量校正定数、使用履歴(過去の実験に関する測定データ)、現在の使用状態がデータベース化されて登録されている。このデータベースから、新規に実施する実験に必要な情報を入力することで、素子を選抜することができる。また、すでに実施した実験ごとにデータ・シートを作成し、その実験に使用した素子の熱蛍光量等の平均偏差やヒストグラムを表示、記録をする機能も持つ。

照射実験実施後には、実験日時や実験条件、実験に使用した素子の熱蛍光量(リーダー読み出し値)を TLD PADLES に入力する。TLD PADLES は、これらの実験結果を以下の 2 種類のファイルとして出力する。

- ① フライト用 TLD-MSO-S 素子に関する測定データ・ファイル(拡張子 tif)、
- ② 地上コントロール用 TLD-MSO-S 素子に関する測定データ・ファイル(拡張子 tlc)。

これらのファイルは次節で述べる AUTO PADLES で読み込まれ、線量計算に使用される。

### 10.3 AUTO PADLES

AUTO PADLESは、フライト・データ管理、CR-39 エッチピット解析、線量計算の三つの機能を持つソフトウェアである。エッチピット解析部分の基本部分(ビットマップ濃淡画像を読み込み、エッチピット開口部の二値化による抽出と楕円フィット)には、放射線医学総合研究所とセイコー・プレシジョン社が共同で開発したアルゴリズム [79]が組み込まれている。

▨ : Functions of TLD PADLES

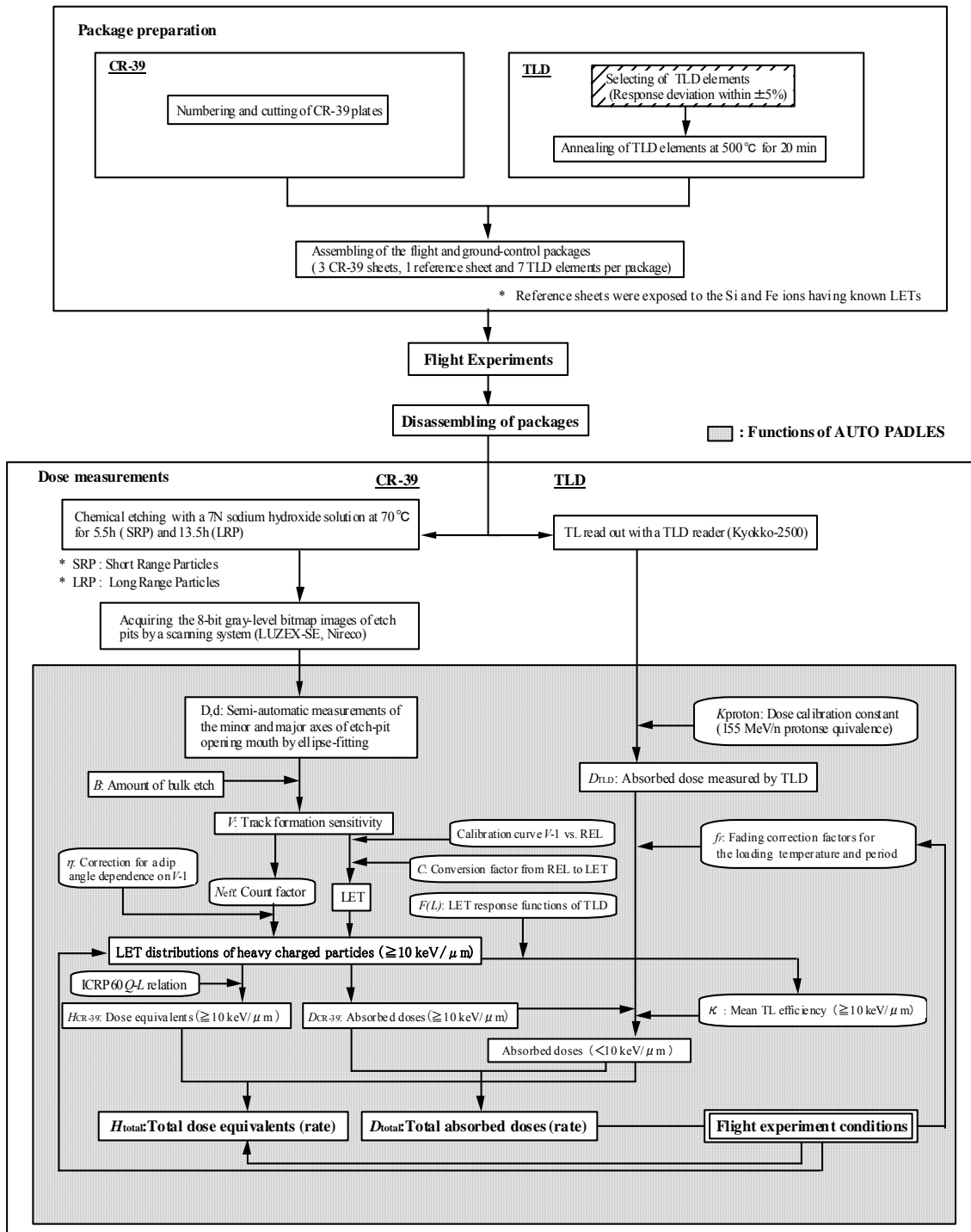


図 10-1 PADLES 線量計の準備から帰還後の解析までの手順。

### 10.3.1 フライト情報データ管理機能

図 10-2 にフライト情報データ管理のためのウインドウ画面を示す。フライト情報データ管理機能により、個々のフライト実験毎に、実験テーマ名、フライト情報、生物試料情報、PADLES線量計仕様、PADLES搭載環境や期間等のフライト情報が管理される。フライト情報は、ファイル(拡張子fdt)に出力される。

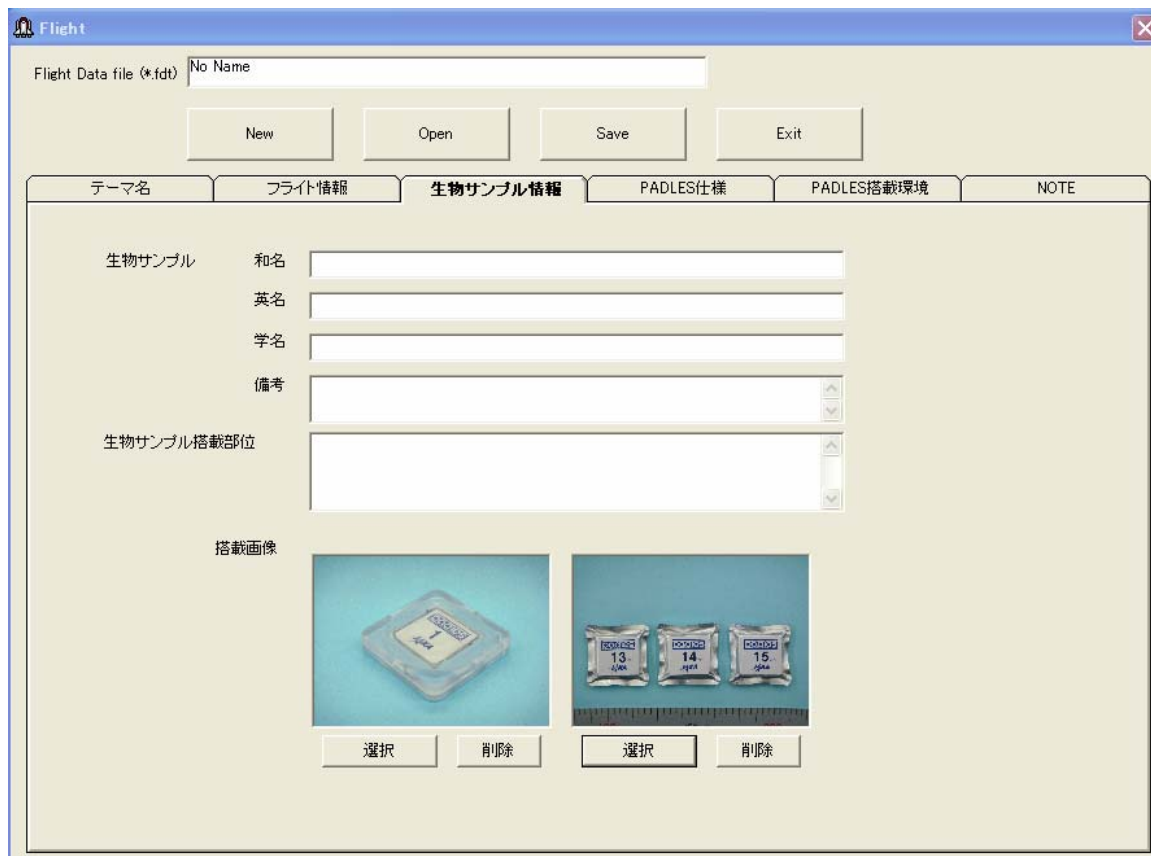


図 10-2 フライト情報データ管理画面。

### 10.3.2 CR-39 エッチピット解析機能

図 10-3 にエッチピット解析のためのウインドウ画面を示す。9.2.2 節で述べたように、ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器のエッチング後の表面は画像取得装置でスキャンされ、256 階調グレー・レベルのビットマップ画像がハード・ディスクに保存される。AUTO PADLESは、このビットマップ画像を読み込んで解析する。まず、あらかじめ指定された二値化しきい値で原画像の二値化を行う。これにより、バルク部分よりも黒く表示されるエッチピット開口部が二値化オブジェクトとして抽出される(図 10-4 左側の画像参照)。次に、AUTO PADLESは、この二値化オブジェクトの周縁座標をあらかじめ指定した間隔でサンプリングし、サンプリングした座標データを楕円フィットする(図 10-4 右側の画像参照)。AUTO PADLESは、二値化オブジェクトが複数個重なっている場合も、それぞれのオブジェクトを分離して楕円フィットする機能を備えている。楕円フィットの結果から、オブジェクト ID番号、楕円重心座標、X軸に対する楕円長軸の角度、楕円の長径・短径、楕円面積等が自動計



算される。これらの計測結果は、CR-39 解析データ・ファイル(拡張子`nap`)として出力される。自動解析で作成されたCR-39 解析データ・ファイルは、手動解析のためにAUTO PADLESで再度読み込むことができる。手動解析では、ごみの除去や、楕円フィットがうまく行かなかったオブジェクトに対する再解析を行うとともに、LET分布の評価に使用するエッチピットを9.2.3節に述べたように選択する。

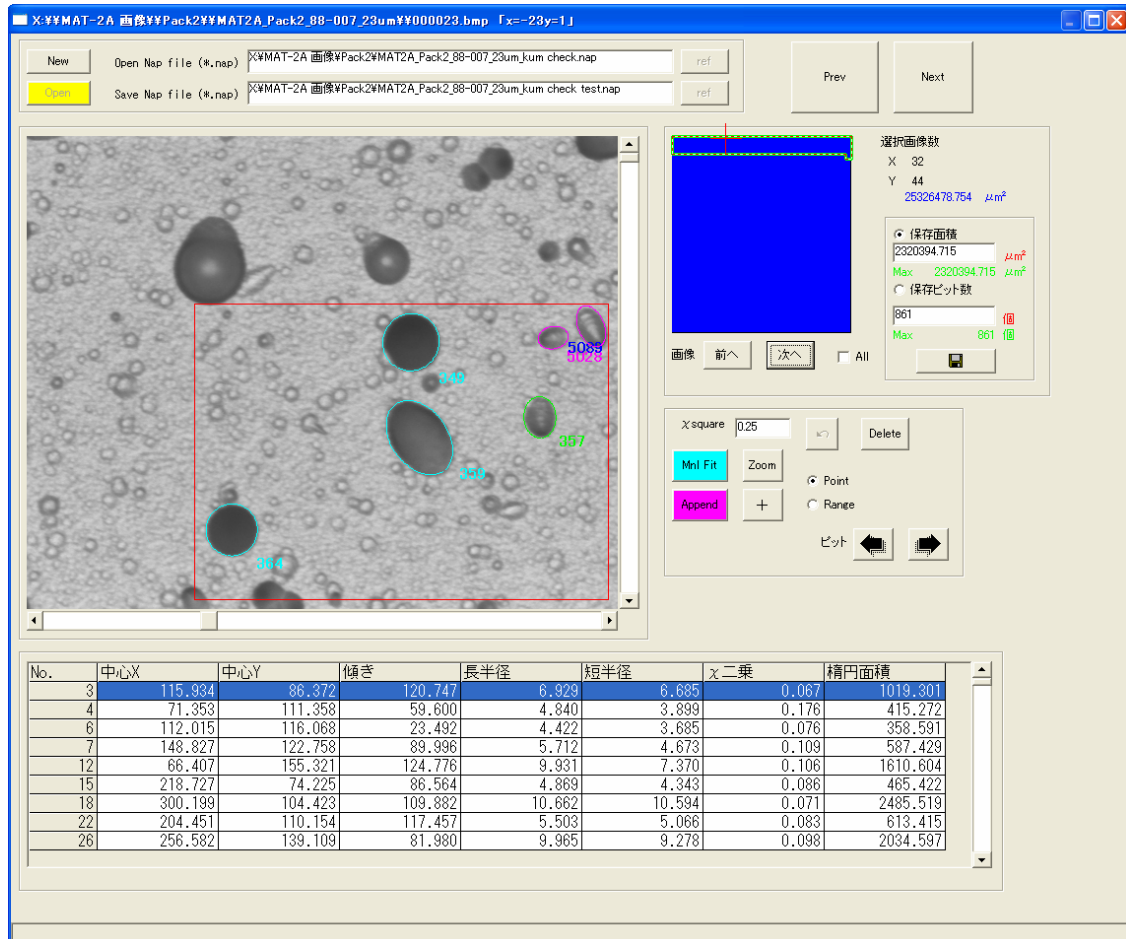


図 10-3 エッチピット解析画面。

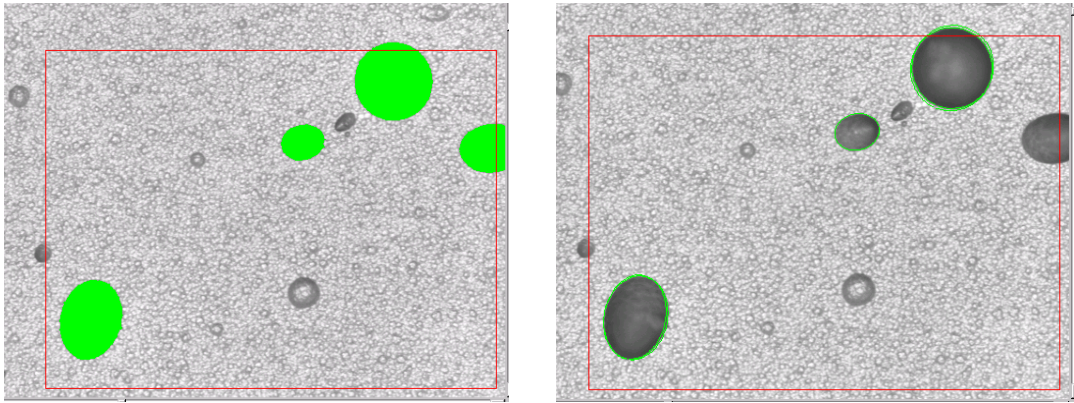


図 10-4 AUTO PADLES による画像処理。左: 画像取得装置で撮像した 256 階調(8 ビット)のビットマップ画像に対し、二値化しきい値を設定して得られた二値化画像。緑色の部分が二値化で抽出されたオブジェクト。右: 解析視野(赤四角枠)内二値化オブジェクトを AUTO PADLES で楕円フィットした結果。この図では、楕円フィットの結果が緑色で示されている。

### 10.3.3 線量計算機能

図 10-5 に線量計算のためのウインドウズ画面を示す。AUTO PADLES は、TLD 測定データ・ファイル(拡張子 `tlf`)、フライト情報データ・ファイル(拡張子 `fdt`)及び CR-39 解析データ・ファイル(拡張子 `.nap`)を読み込み、第 8 章で述べた計算方法に基づき、LET 分布、吸収線量、線量当量及び平均の線質係数を自動計算する。線量計算に必要なパラメータとして以下がデータベースとして組み込まれている。

- ① ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の校正曲線
- ② ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の SRP 試料及び LRP 試料のバルク・エッチング量
- ③ ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の  $REL_{\omega_0=200\text{eV}}$  ( $\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}\text{-CR-39}$ ) から LET( $\text{keV}/\mu\text{m}\cdot\text{water}$ )への換算係数
- ④ ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の検出効率補正係数  $\eta$
- ⑤ ICRP60 の  $Q\text{-LET}$  関係式
- ⑥ TLD-MSO-S 素子のリーダー読み値から水等価吸収線量への換算係数
- ⑦ TLD-MSO-S 素子の LET 応答関数
- ⑧ TLD-MSO-S 素子のフェーディング補正係数

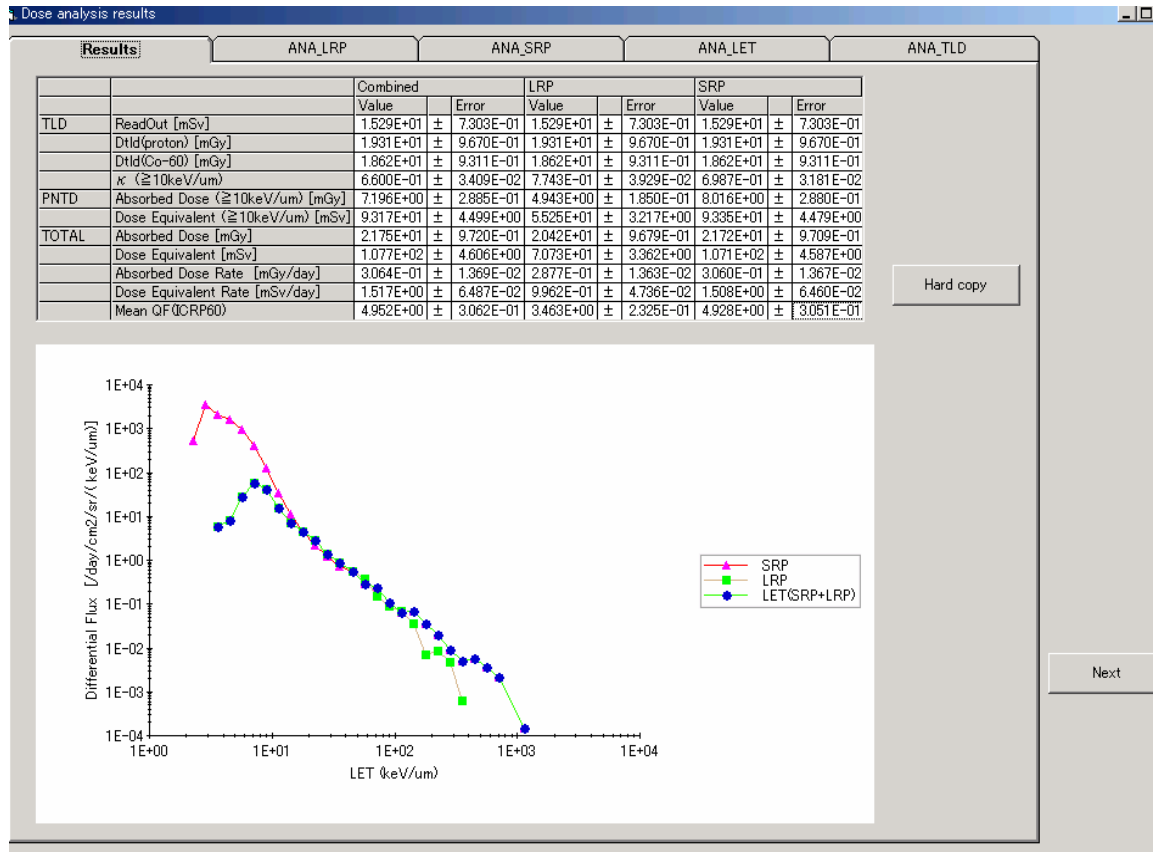


図 10-5 線量計算画面。

## 第11章 PADLES 線量計測定精度の評価

### 11.1 宇宙放射線検出器・国際比較実験 ICCHIBAN project

ICCHIBAN プロジェクト(Inter Comparison for Cosmic-ray Heavy Ion Beams At NIRS)は、宇宙放射線被ばく評価を正確に行うことを目的として、ISSに搭載予定の各国宇宙放射線測定器の線量応答を校正・相互比較する地上照射実験である[3][4][5][6]。ICCHIBAN プロジェクトでは、宇宙放射線環境を模擬するために種々の加速器からの重イオン・ビームを利用している。これまで各国宇宙放射線測定器で測定されてきたLET分布や、線量測定値における食い違いの原因を明確にし、ISSでの線量計測を行う線量計機器の国際標準化を目的としている。放射線医学総合研究所(放医研)宇宙放射線防護プロジェクトの研究者が中心となって、「ICCHIBANワーキング・グループ」が組織され、これまで、HIMAC重イオン加速器やロマリンダ大学サイクロトロン施設等を使用して照射実験が実施されてきた。

各照射実験では、“known 照射”と、“unknown 照射”の2タイプの実験が行われる。known 照射では、照射した核種やエネルギー、線量、重イオン照射密度等の照射条件が示されるので、参加グループはこれにより自分の線量計機器の校正を行うことができる。unknown 照射の条件は参加グループから測定結果が提出されるまでは明らかにされない。照射実験ごとに、H～Kr核までの内から3～4種類の核種を選んで照射し、すべての照射実験を通じて宇宙放射線中の主要な核種とエネルギー範囲を網羅するよう計画されてきた(表 11-1 参照)。一連の実験が終了後、ICCHIBAN ワーキング・グループによって各研究グループから提出された解析結果がまとめられ、比較結果が検討される予定である。途中経過については、WRMISS 国際会議(Workshop on Radiation Monitoring for the ISS)にて報告・議論され、必要に応じて勧告が行われる。

表 11-1 ICCHIBAN 実験実施状況。

実施時期	実験名称	場所	対象となる線量計	JAXA参加状況	模擬する宇宙放射線	解析状況・成果
2002.2	Icchiban 第1回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	能動型	-	1 GeV/n以下の宇宙放射線(He,C,Si,Fe)	Unknown照射実験において、他国の計測器が30~40%の測定精度を示したが、JAXAは10%以内の最も高い測定精度を示した。TLDと固体飛跡検出器の組み合わせが宇宙放射線計測に必須であると確認された。
2002.5	Icchiban 第2回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	受動型	PADLES		
2003.2	Icchiban 第3回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	能動型	-	1 GeV/n以下の宇宙放射線 (gamma,He,C,Ne,Fe+Al/H <sub>2</sub> O遮蔽)	多くの宇宙放射線検出器において、宇宙環境に近い条件では満足できる一致が見られ、線量に対する直線性も確認できた。
2003.5	Icchiban 第4回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	受動型	PADLES		
2004.2	Icchiban 第5回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	能動型	-	1 GeV/n以下の宇宙放射線 (gamma,He, C,Ar,Kr)	解析終了。 (放医研+Icchiban WGが取りまとめ評価中。)
2004.6	Icchiban 第6回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	受動型	PADLES		
2005.7	Icchiban 第7回& 8回	放医研 重粒子加速器 HIMAC	能動型/受動型	PADLES	1 GeV/n以下の宇宙放射線(O,FeHe,C)	各機関で解析中。 (JAXAは解析終了。)
2003.9	Proton-ICCHIBAN	米国ロマリダ大学 陽子サイクロトロン	能動型/受動型	PADLES	過去に起きた最大の太陽フレア (陽子:~250MeV)	解析終了。 (放医研+Icchiban WGが取りまとめ評価中。)
2005.10	NSRL-ICCHIBAN	米国ブルックヘブン NASA加速器施設NSRL	能動型/受動型	PADLES	1 GeV/n以上の宇宙放射線 (銀河宇宙線 P,O,Fe)	解析終了。 (放医研+Icchiban WGが取りまとめ評価中。)
2006.11	CERF-ICCHIBAN	OREN加速器施設CERF	受動型	PADLES	高エネルギー中性子	各機関で解析中

2002 年第 2 回実験から、PADLES 線量計も参加した。以下では、2002 年 5 月に実施した ICCHIBAN 第 2 回実験の unkonwn 照射に対する PADLES 線量計の測定結果について述べる。この実験は放医研 HIMAC 重イオン加速器施設で行われ、表 11-2 に示すような条件の重イオン・ビームが使用された。この実験では、宇宙環境とは異なり、線量計パッケージ表面に重イオンを垂直入射させた照射が行われた。PADLES 線量計の測定結果を表 11-3 に示す。また、参加研究グループがそれぞれの解析を終了した後にワーキング・グループが明らかにした unkonwn 照射の条件を表 11-4 に示す。図 11-1 と図 11-2 に示したのは、それぞれ ICCHIBAN 第 2 回実験 unkonwn 実験の Run1 と Run3 の結果を参加機関の間で比較したものである。線量計に CR-39 プラスチック飛跡検出器を使用していない機関のデータは、吸収線量は測定できているが、線量当量は測定できていない。図 11-1 と図 11-2 からわかるよう、ICCHIBAN 第 2 回実験の unkonwn 照射による相互比較では、PADLES 線量計が吸収線量、線量当量ともに最も照射設定線量に近い値を示した。この ICCHIBAN 第 2 回実験についての ICCHIBAN ワーキング・グループのまとめでは、PADLES 線量計の吸収線量に対する誤差は 3.3%、線量当量に対する誤差は 5%と評価されている。

表 11-2 Icchiban 実験#2 で使用された重イオン・ビーム。

\*Ion chamber measurement

Date	Ion	Nominal Energy (MeV/n)	Actual Energy (MeV/n)	Range in H <sub>2</sub> O (cm)	LET <sub>∞</sub> H <sub>2</sub> O (keV/μm)
24/05/02	<sup>4</sup> He	150	143.5	14.2	2.29
25/05/02	<sup>12</sup> C	400	396.9	26.6	11.19
23/05/02	<sup>28</sup> Si	490	446.6	13.74	57.55
28/05/02	<sup>56</sup> Fe	500	420.6	7.26	204.2

表 11-3 Icchiban 実験#2 unkonwn 実験の PADLES 線量計による測定結果。

Unkonwn Run No.	D <sub>TLD</sub> mGy	D <sub>LET&gt;10</sub> mGy	H <sub>LET&gt;10</sub> mSv	κ	D <sub>TOTAL</sub> mGy	H <sub>TOTAL</sub> mSv	Q <sub>AVE</sub>
1	105.9 ± 5.8	3.3 ± 0.2	41.5 ± 2.3	0.72	106.8 ± 5.8	145.0 ± 6.0	1.4 ± 0.1
2	6.0 ± 0.3	5.8 ± 0.2	75.7 ± 1.7	0.70	7.8 ± 0.3	77.6 ± 1.7	10.0 ± 0.4
3	15.1 ± 0.1	13.6 ± 0.5	187.5 ± 7.0	0.68	19.4 ± 0.2	193.3 ± 7.0	10.0 ± 0.4
4	0.18 ± 0.02	0.36 ± 0.01	6.57 ± 0.25	0.54	0.35 ± 0.02	6.56 ± 0.17	18.6 ± 1.0
5	13.4 ± 0.9	17.9 ± 0.6	306.3 ± 11.8	0.58	20.9 ± 0.9	309.3 ± 11.8	14.8 ± 0.8
6	3.7 ± 0.1	6.1 ± 0.3	124.6 ± 6.3	0.59	6.2 ± 0.2	124.7 ± 6.3	20.1 ± 1.1
7	1.6 ± 0.1	1.6 ± 0.1	3.1 ± 0.2	1.00	1.6 ± 0.1	3.1 ± 0.2	2.0 ± 0.2
8	0.8 ± 0.1	2.0 ± 0.1	41.6 ± 1.1	0.45	1.9 ± 0.1	41.5 ± 1.1	21.8 ± 1.1

表 11-4 ワーキング・グループによって示された Icchiban 実験#2 unknown 照射条件。

	$^4\text{He}$	$^{12}\text{C}$	$^{28}\text{Si}$	$^{56}\text{Fe}$
1. Space	100 mGy	1 mGy	1 mGy	1 mGy
2. Equal Dose No. 1	2 mGy	2 mGy	2 mGy	2 mGy
3. Equal Dose No. 2	5 mGy	5 mGy	5 mGy	5 mGy
4. Equal Fluence	1000 $\text{cm}^{-2}$	1000 $\text{cm}^{-2}$	1000 $\text{cm}^{-2}$	1000 $\text{cm}^{-2}$
5. "Magic"	1 mGy	3 mGy	7 mGy	12 mGy
6. 10 $\text{g}/\text{cm}^2$ Al (Si), 5.4 $\text{g}/\text{cm}^2$ Al (Fe)			5 mGy	1 mGy
7. 10 $\text{g}/\text{cm}^2$ Al + 5.4 $\text{g}/\text{cm}^2$ PMMA			2 mGy	
8. Spread Out Bragg Peak				5000 $\text{cm}^{-2}$

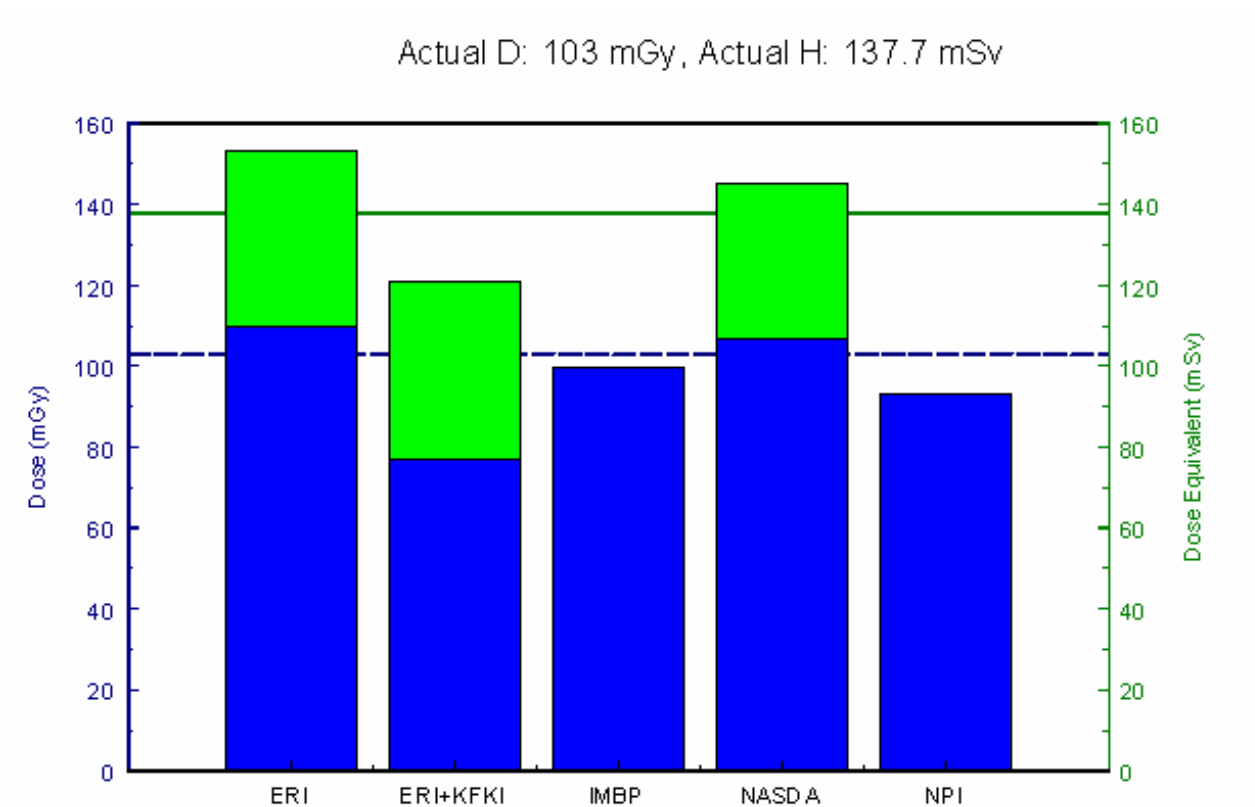


図 11-1 ICCHIBAN 第 2 回実験の unknown 照射 Run1 における各機関の受動型線量計の測定結果の比較。横軸に NASDA とあるのが PADLES 線量計の測定結果である。

Actual D: 20 mGy, Actual H: 193.6 mSv

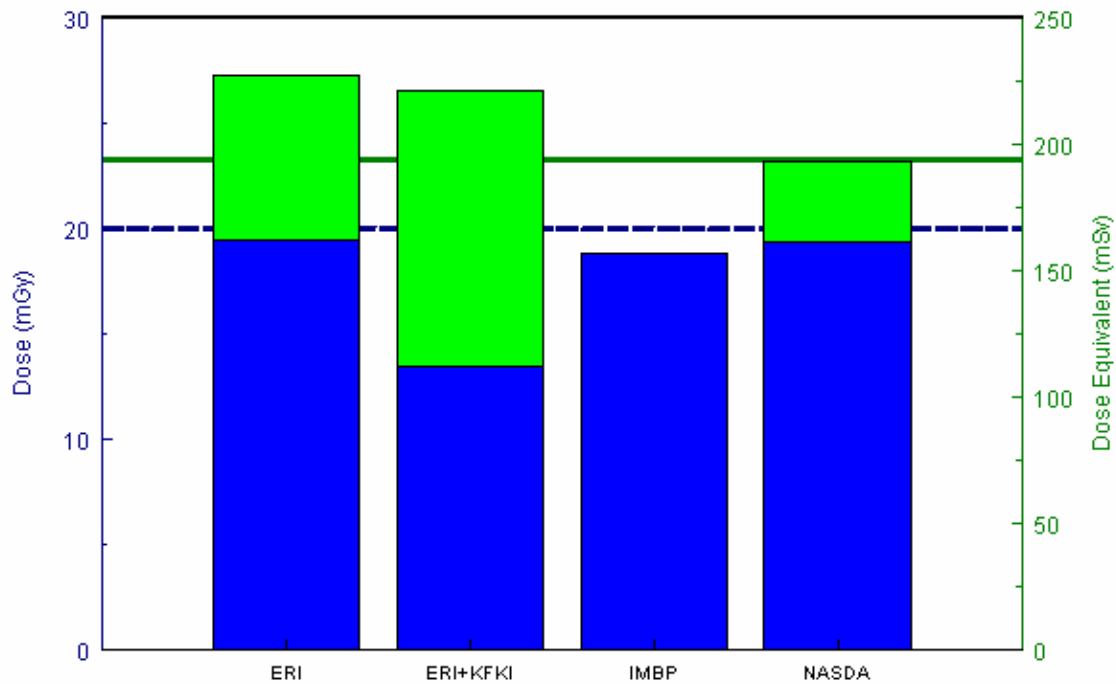


図 11-2 ICCHIBAN 第 2 回実験の unknown 照射 Run3 における各機関の受動型線量計の測定結果の比較。横軸に NASDA とあるのが PADLES 線量計の測定結果である。

## 11.2 PADLES 線量計の測定精度に影響する要因

本節では、PADLES 線量計で宇宙放射線計測をする際の測定精度に影響すると考えられる要因について現在明らかになっているものについて述べる。

TLD-MSO-S 素子は、ISS 搭載前に熱蛍光効率が $\pm 5\%$ 以内に収まるものを選抜して用いている。TLD-MSO-S 素子の TLD リーダー読み値から陽子に対する水等価吸収線量への校正定数の誤差は  $3.6\%$  ( $3\sigma$ ) である。TLD-MSO-S 素子のフェーディング補正係数の誤差は、室温で半年間搭載され、ISS 帰還から一ヶ月後に測定されたとして  $3.0\%$  である (9.4.5 節参照)。また、熱蛍光効率の LET 依存性の補正の吸収線量及び線量当量に対する系統的誤算は最大で  $5\%$  と見積もった。

ハーツラス TD-1 プラスチック検出器は、約  $28\text{cm}$  角の板として製造元から供給される。板全面に渡り重イオン照射を行って飛跡生成感度の一様性を調べた結果、板の場所に依存して $\pm 6\%$ の変化があることがわかった。また、エッチピット形状測定は基本的に自動で行われるが、最終的にオペレータが個々のエッチピット形状を確認し、バックグラウンド・オブジェクトの除去や自動楕円フィットがうまくいかなかった場合の手動による再計測を行うが、この時に属人誤差が生じる。同一の宇宙放射線照射試料を数人で測定した結果、この属人誤差を最大  $3.5\%$  と見積もった。ハーツラス TD-1 プラスチック検出器のエッチピット測定から LET 分布を算出するには、校正曲線を使用する。この校正



曲線の誤差の線量に与える影響は 1.1%と見積もられた。

打ち上げから回収まで、線量計が測定を実施する目的の場所に設置される期間は、全搭載期間の 90%程度となる。(宇宙飛行士による取り付け作業や回収のスケジュールの制約により打ち上げ初日の取り付けや期間当日の回収ができないため、100%は達成できない。)目的の場所に設置されない期間によって生じる計測の不確かさを、最大で 10%と見積もる。

以上に述べた測定制度に影響する要因を、誤差伝播の法則で評価するとPADLES線量計の精度は最大 15%である。上述した誤差要因以外にも測定精度に影響する要因があると考えられるが、(NCRP)レポートNo.142[31]が要求する宇宙放射線計測機器に対する要求精度 30%を超えることはないと考えられる。

線量計の精度評価には標準放射線校正場が必要である。ICCIBANN プロジェクトでも宇宙放射線環境を模擬した地上加速器を用いた標準校正場を整備することを目指しているが残された課題は多い。PADLES 線量計の測定精度を正しく評価するには今後さらに検討が必要である。

## 第12章 PADLES 線量計を用いた ISS における宇宙放射線計測

### 12.1 HTDV・CCD 放射線損傷実験

#### 12.1.1 実験概要

ISS ロシア・サービス・モジュールにおいてハイビジョン (High definition television : HDTV) ・カメラ用 CCD の放射線損傷実験が行われ、その一環として PADLES 線量計による線量計測が実施された。スペース・シャトルや ISS に搭載した CCD カメラから得られた画像には、多くの永続的損傷 (白傷) が見られ、搭載期間に比例してその白傷が増えることが確認されている [80][81]。HDTV カメラの技術の進歩に伴い宇宙でも HDTV カメラの使用が始まり、その白傷発生も問題視された [82][83]。白傷は、ビデオ画像の品質を下げるため、ISS で使用するためには、定期的なカメラの交換が必要となる。HDTV・CCD 素子は、従来の CCD 素子よりも放射線影響が大きく、白傷もできやすい。

CCD 素子の放射線損傷によりビデオ画像上に白傷が発生することはよく知られている。これは、CCD 素子の bulk displacement damage によって引き起こされる [84][85][86]。この bulk displacement damage は、CCD 素子内部での non ionizing energy loss (NIEL) に起因すると示唆されている。荷電粒子や中性子が CCD 素子内部で NIEL をおこし、CCD 素子の Si 原子が結晶中の格子点から離れてしまうと点欠陥が格子中に形成され、白傷を引き起こす。この NIEL を軌道上で直接測定することは難しい。そこで、PADLES 線量計で測定した積算吸収線量と白傷発生率を比較することで、HDTV・CCD 素子の定量的な放射線影響を調べた。本実験が、ISS 軌道上において HDTV・CCD 素子の放射線損傷影響を測定し、同時に線量計測を行ったのはじめての実験である。

TLD と CR-39 プラスチック飛跡検出器を内蔵した 3 つの CCD ホルダー (#1、#2、#3) が、2001 年 8 月 31 日にカザフスタン共和国バイコヌール射場から、Progress M-45 によって打ち上げられ、ISS ロシア・サービス・モジュールに搭載された。CCD ホルダーの ISS 搭載位置を図 12-1 に示す。

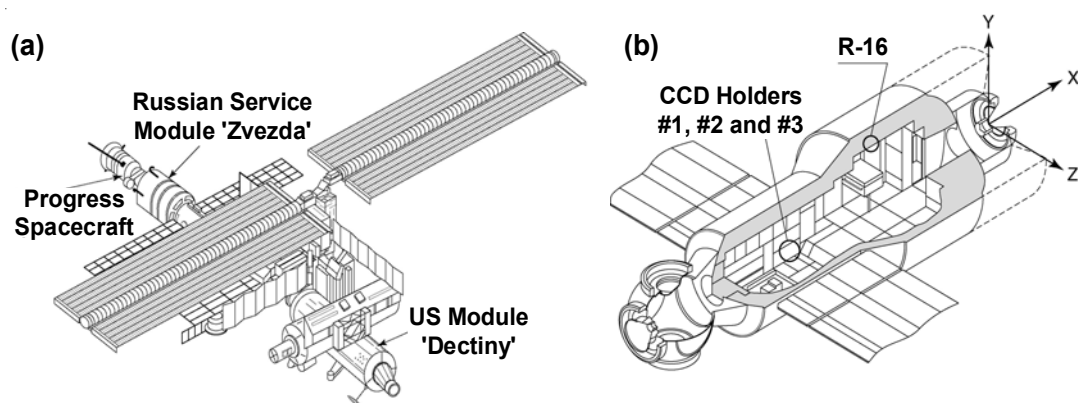


図 12-1 ISS での CCD ホルダー搭載位置。(a)ISS におけるロシア・サービス・モジュール (Zvezda) の位置。(b) ロシア・サービス・モジュール船内の CCD ホルダー設置位置。

### 11.1.2 CCDホルダー

CCDホルダーに収納された線量計素子及びCCD素子の仕様を表12-1に示す。

表 12-1 CCDホルダー内の構成品。

Constituent	Type	Manufacture	number	Note
Dosimeters				
TLD	TLD-MSO-S	Kasei Optonics, LTD.	10	For Dsimetry
	UD-807 PRN	Panasonic		
	UD-807 ASC	Panasonic		
CR-39 PNTD	TD-1 (0.9mm <sup>t</sup> )	Fukivi Chemical Industry	3	For Particle Tacking
	TNF-1 (0.9mm <sup>t</sup> )		3	
	TD-1 (0.9mm <sup>t</sup> )		8	
	BARYOTRAK(0.45mm <sup>t</sup> )		16	
	TD-1 (0.9mm <sup>t</sup> )		2	For reference to check CR-39 sensitivity stability during a space flight
Sensors and devices				
CCD	ICX230AS ES02	SONY	3	HCCAM comcoder High-Definition 2.2 mega pixelated, 2/3inch FIT type CCD
C-MOS	PB-1024	Photobit	1	1mega pixelated, 145 pin Ceramic PGA

CCDホルダーの断面図を図12-2に示す。線量計測用のTLD-MSO-S素子とハーツラスTD-1プラスチック板はCCDホルダーの側面に収納した。本実験では、線量計測を行うとともに、高Z高エネルギー粒子(HZE粒子)の通過位置とCCDの白傷との対応も調べた[87][88]。そのために、図12-3に示すように、CR-39プラスチック飛跡検出器スタックを、CCDホルダー内に収納された4枚の撮像素子上面および下面に設置した。

各搭載期間に対応して、コントロール用CCDホルダー3つが、バイコヌール射場にて保存され、地上保管中の線量を差し引くために使用された。

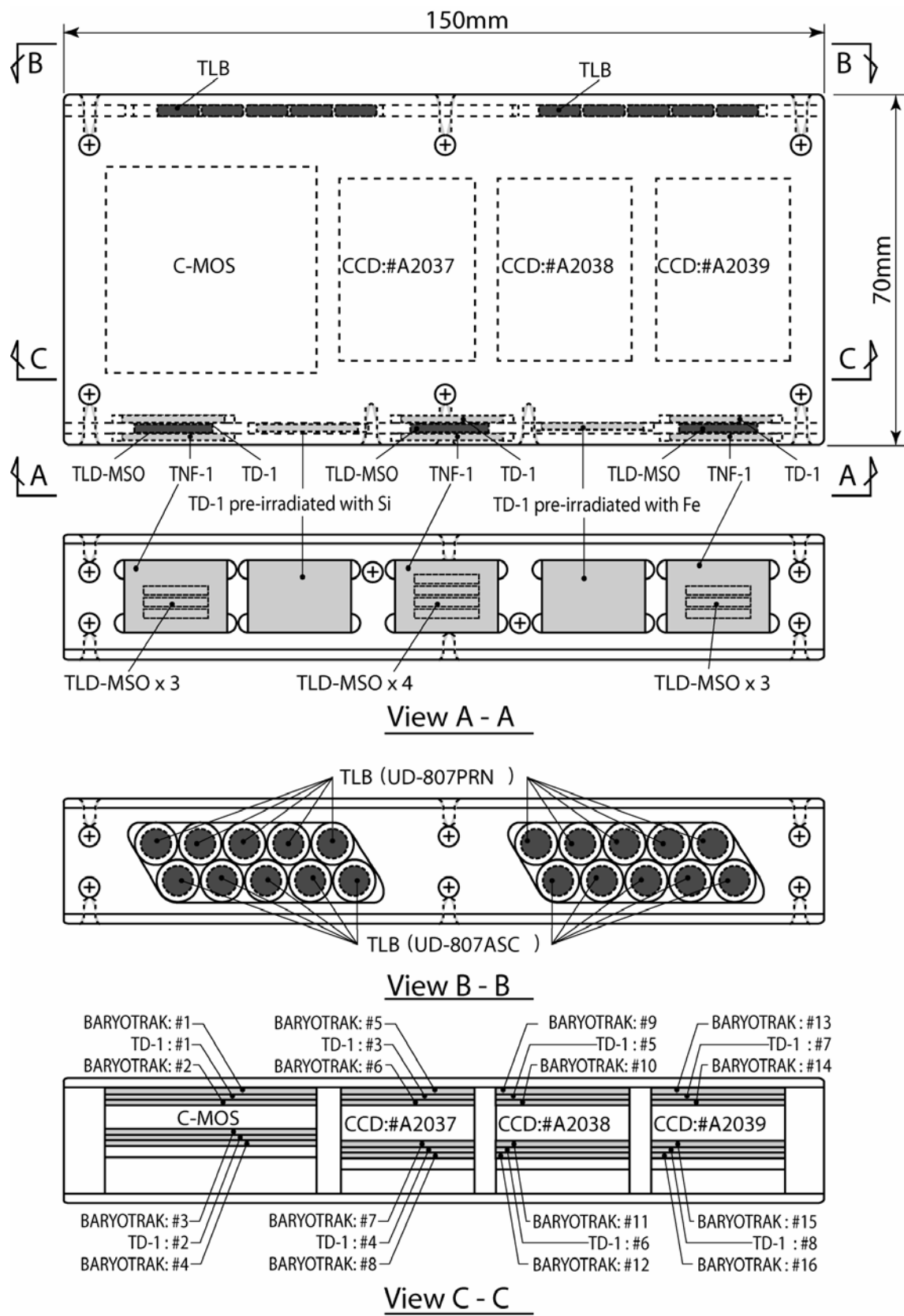


図 12-2 搭載した線量計の断面図。

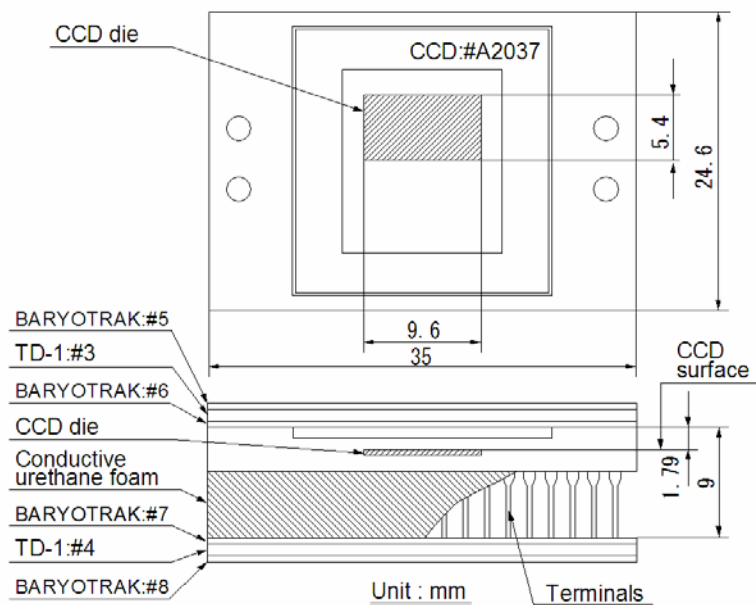


図 12-3 HZE 粒子トラッキングのための CR-39 飛跡検出器と CCD のスタックの断面図。

### 12.1.3 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の飛跡生成感度の確認

ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の解析に伴先立ち、パッケージ側面に搭載した参照用試料(地上加速器にてあらかじめ Fe イオンと Si イオンを照射したハーツラス TD-1 プラスチック板)の飛跡生成感度の確認を行った。2 回の帰還試料と地上コントロール試料で測定した飛跡生成感度の違いはほとんど無く、HIMAC 重イオン加速器を用いてあらかじめ取得してあった校正曲線を用いて LET 分布を算出できることが確認された(図 12-4 参照)。

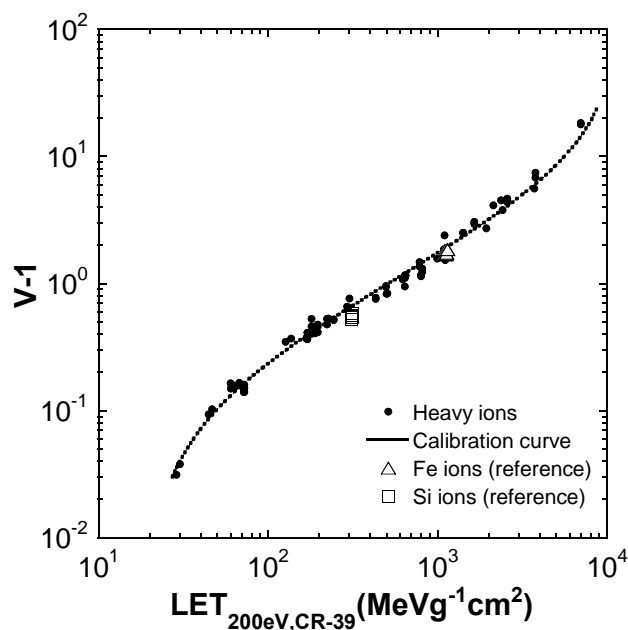


図 12-4 校正曲線と参照用試料から得られた飛跡生成感度の比較。

#### 12.1.4 HZE 粒子と白傷との相関

CCD素子の撮像有効領域は  $1920 \times 1080$  pixels、 $0.52\text{cm}^2$ である。ISSからの帰還後、CCD素子の各ピクセルは白傷カウンタ(WDC-101)によって出力電圧が測定され、放射線損傷によって発生したCCD素子上の白傷の位置が特定された。

HZE 粒子のトラッキングは、CCD の上面と下面に設置したそれぞれ 3 枚組みの CR-39 スタックで行った(図 12-3 参照)。それぞれの CR-39 スタックは、中央が粒子の LET を測定するためのハースラス TD-1 で、その上下に粒子位置を特定するためのバリオトラック(フクビ化学工業社製)を配置してある。トラッキングによって得られた粒子飛跡の画像例を図 12-5 に示す。

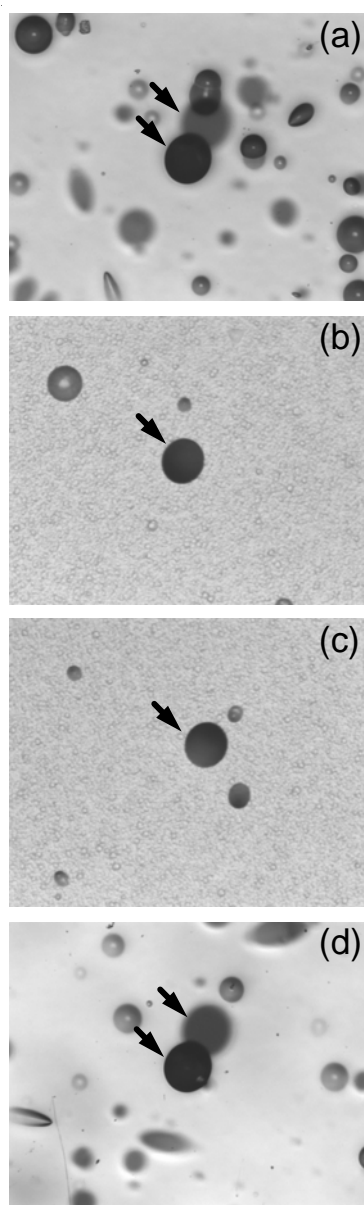


図 12-5 HZE 粒子のトラッキング画像例。(a)及び(d)バリオトラック。(b)及び(c)ハースラスTD-1。プラスチックを貫通した HZE 粒子の飛跡に沿って成長したエッチピットを図中の矢印で示す。

HZE 粒子の飛跡が光学顕微鏡下で容易に観測できるように、BARYOTRAK は  $70^{\circ}\text{C}7$  規定の

NaOH 溶液で 61.5 時間の化学エッチング処理を施し、エッチピットを大きく成長させた。長時間エッチングしたバリオトラックの板では、表面から成長したエッチピットの隣に裏面から成長したエッチピットが透けて観測され、ちょうど蝶のような形に見えるため、このようなエッチピットの組を HZE 粒子の飛跡の候補とした。トラッキングは、CCD 表面に接するバリオトラックの板の裏面から開始した。まず、撮像有効領域とその外側縁辺 2mm を含む領域を手動でスキャンし、図 12-5(a)(d)のような貫通粒子のエッチピットの組を探す。板の表裏それぞれのエッチピット重心位置の XY 座標とエッチング前後のバリオトラック及びハーツラス TD-1 の板厚から、スタック最上面のバリオトラックの板の裏面の飛跡位置を予測する。次に、最上面のバリオトラックの板をスキャンし最下面のバリオトラック板のエッチピットから予測した位置に貫通粒子のエッチピットの組があることを確認した。トラッキング・データを取得した後、飛跡を構成する 4 組のエッチピットの向きや大きさを計測して同一の粒子によって形成したエッチピットであることを再度確認し、バックグラウンドを除外して撮像有効領域を通過する飛跡を確定した。

粒子の LET を測定するためにハーツラス TD-1 の板は 70°C 規定の NaOH 溶液で 13.5 時間エッチングされた。トラッキング・データから、TD-1 の表面と裏面のエッチピット位置を予測し、貫通粒子に対応するエッチピットであることをエッチピットの向きや大きさで判別した。TD-1 表面と裏面の 2 個のエッチピット開口部の長径、短径を計測し、それらからそれぞれの飛跡形成感度を計算し、図 12-4 の校正曲線を用いて LET を求めた。

CCDホルダー#1(71 日間搭載)に収納されたCR-39 スタックで観測したHZE粒子のLET変化率とLET平均値の関係を図 12-6 に示す。各HZE粒子のLET値はTD-1 表面のエッチピットから評価した値LET1と裏面のエッチピットから評価した値LET2の二つがある。この図の横軸LET<sub>mean</sub>は、LET1とLET2 の平均値を表している。縦軸は、TD-1 の板を通過したときのHZE粒子のLET変化率( $dLET_{water}/dx_{CR-39} = |LET1-LET2|/\Delta T$ )を示している。ここで $\Delta T(=t/\cos\theta)$ はHZE粒子が通過したCR-39 プラスチックの長さで、 $t$ は板厚、 $\theta$ はHZE粒子の伏角である。CCDホルダー#1 には、3 枚の CCD (# 2037、# 2038、# 2039) が収納されていた。CCD#2038 の CR-39 スタックでは TD-1 の片面でエッチングムラのため正確なLET値が算出できなかったため、CCD#2037 と CCD#2039 の CR-39 スタックで得られたデータをプロットした。実線と点線はそれぞれSRIM2000 計算コード[60]を用いた鉄核とSi核の計算結果である。図 12-6 に示した結果から、本測定でトラッキングできたHZE粒子はLETが約 100keV/μm以上のものであり、そのほとんどは、SiからFe核までに相当すると推定される。

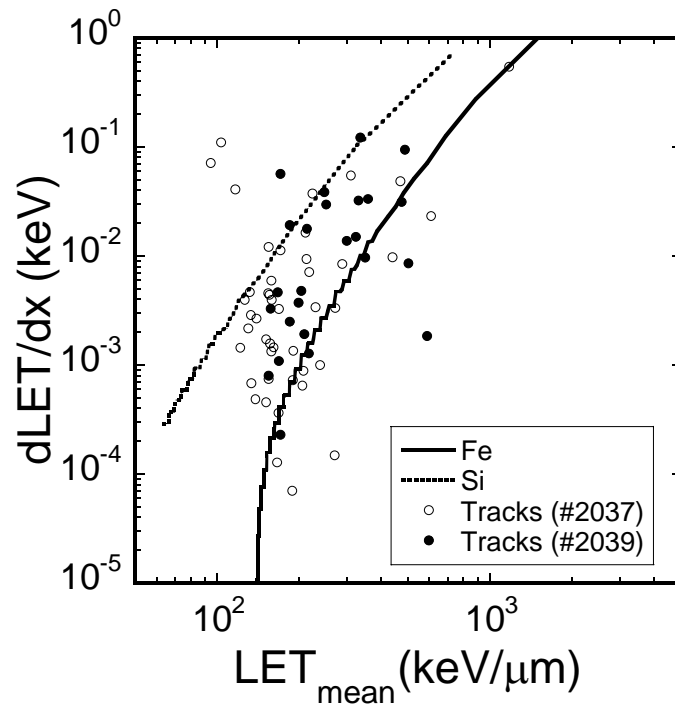


図 12-6 トラッキングで観測した HZE 粒子の LET 変化率と LET 平均値の関係。

CCD ホルダー#2 と#3 では、エッチピット密度が高すぎて解析が困難であったため、HZE 粒子飛跡と白傷の相関は、71 日間搭載された CCD ホルダー#1 についてのみ解析した。表 12-2 に 100keV/μm 以上の HZE 粒子飛跡と CCD の白傷位置が一致したイベント数、及び検出できた HZE 粒子飛跡数示す。

表 12-2 CCD 表面に入射した HZE 粒子と白傷の相関。

CCD chip No.	A2037	A2038	A2039	Total
Number of white defects coincident with HZE particle tracks				
Output voltage (mV)				
0.5~5	4	2	2	8
5~10	1	0	1	2
10~20	2	0	1	3
≥ 20	2	0	0	2
Total	9	2	4	15
Number of HZE tracks hitting CCD dies				
Forward	22 (6 <sup>a</sup> )	16	16	78 (6 <sup>a</sup> )
Backward	24 (6 <sup>a</sup> )	ND	ND	

<sup>a</sup> Number of forward tracks coincident with backward tracks.

また、図 12-7 に HZE 粒子飛跡と CCD の白傷位置をプロットした。図 12-7 上に矢印で示されているのが、HZE 粒子飛跡と CCD の白傷位置が一致したイベントである。表 12-2 と図 12-7 に示した結果から、Si 核以上の HZE 粒子の飛跡の 80%は、白傷に対応しないことがわかった。また、HZE 粒子の飛跡が観測されなかったところにも多くの白傷が発生した。このことから、Si 核以上の HZE 粒子は、CCD の白傷の主な原因ではないことが示唆される。



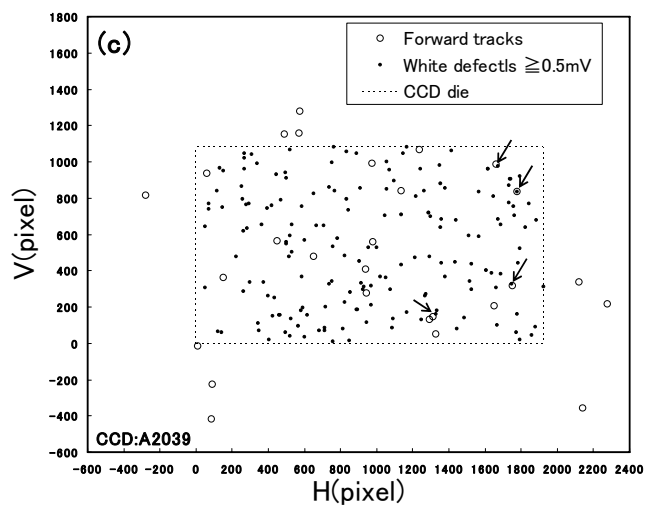
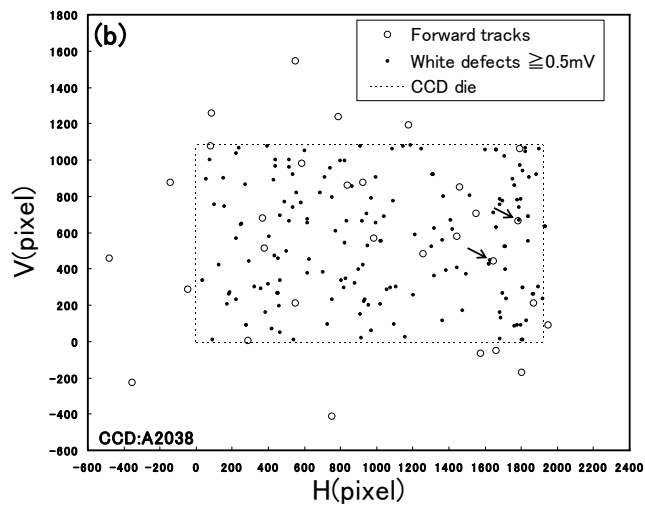
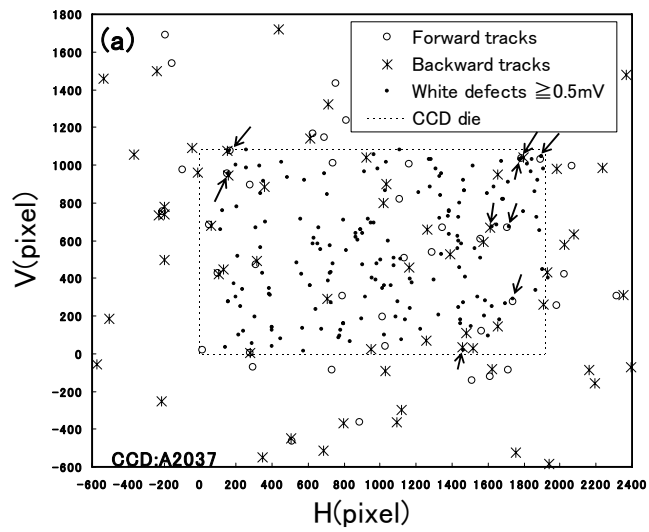


図 12-7 CCDで検出された出力電圧 5mV以上に相当する白傷と 100keV/ $\mu\text{m}$ 以上のLETを持つHZE粒子飛跡の位置。矢印は両者の位置が一致したイベントを示す。

表 12-3 に CCDホルダー#1、#2、及び#3 に収納された CCD素子の白傷の個数を示す。白傷の個数は、搭載期間が長くなるに連れて増加していることがわかった。過去に、STS-91 スペース・シャトルに搭載したRRMD-IIIシリコン検出器でISS軌道での 0.06 keV/μm から 600 keV/μm 領域の LET 分布が測定されている [43]。この LET 分布から推定すると、100 keV/ μm 以上の粒子フラックスは全体の 1×10<sup>-5</sup>% に過ぎない。今回のトラッキング測定の結果と合わせると、Si核以上の HZE 粒子は HDTV・CCD の白傷の主要な原因ではなく、白傷のほとんどは、宇宙放射線のフラックスの大部分を占める陽子の寄与が大きいと推定される。

表 12-3 白傷の測定結果。

Flight time (days)	Condition	CCD	Number of white defects					Total	Average
			Output voltage (mV)						
			0.5-5	5-10	10-20	≥20			
71	Flight	A2037	123	11	25	17	176	171.7 ± 4.5	
		A2038	106	23	21	17	167		
		A2039	117	17	16	22	172		
	Ground	A2047	3	0	0	0	3		
		A2048	2	0	0	0	2		3.7 ± 2.1
		A2049	3	2	0	1	6		
257	Flight	A2040	417	79	72	91	659	619 ± 52	
		A2041	339	75	74	72	560		
		A2042	403	76	62	96	637		
	Ground	A2050	7	1	0	1	9		
		A2051	7	1	2	0	10		8.0 ± 2.6
		A2052	5	0	0	0	5		
446	Flight	A2043	668	117	114	135	1034	1063 ± 74	
		A2044	649	134	103	123	1009		
		A2045	735	150	135	127	1147		
	Ground	A2057	7	0	1	1	9		
		A2058	8	3	1	0	12		10.3 ± 1.5
		A2059	9	1	0	0	10		

### 12.1.5 線量計測

CCDホルダー側面に搭載したハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器と TLD-MSO-S 素子のデータから、ISS ロシア・サービス・モジュールに搭載された CCDホルダー内の LET 分布、吸収線量、線量当量、平均の線質係数を測定した。

ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器で測定した LET 分布を図 12-8 に示す。この図には、トラッキングで検出した HZE 粒子の LET 分布 (Forward tracks: サービス・モジュール船外側から入射した HZE 粒子; Backward tracks: サービス・モジュール船内側から入射した HZE 粒子) も示した。トラッキングで検出した HZE 粒子は、100keV/μm 以上の領域に分布し、対応する吸収線量は、CCDホルダーの上部(サービス・モジュール船内側)が 0.06±0.01 mGy、CCDホルダーの下部 0.10±0.01 mGy (サービス・モジュール船外側)であった。

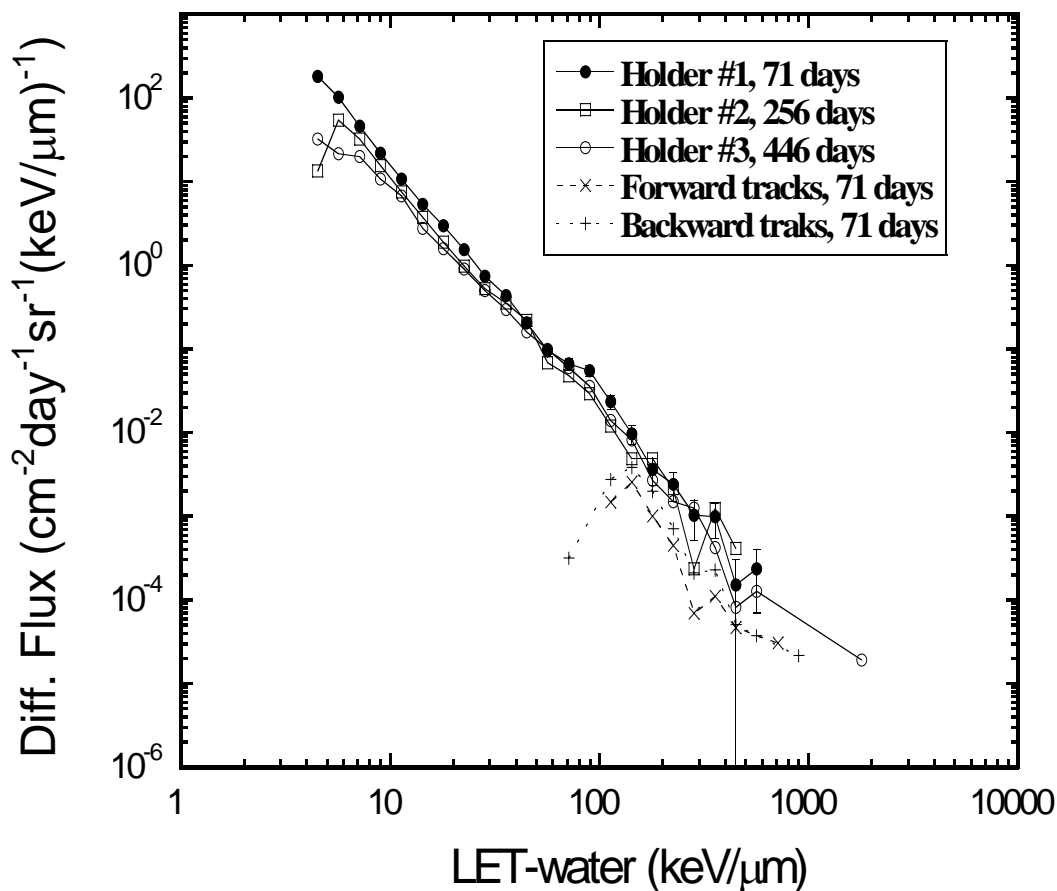


図 12-8 ロシア・サービス・モジュールに搭載した CCD ホルダー#1、CCD ホルダー#2、CCD ホルダー#3 内のハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器で測定された微分 LET 分布。

表 12-4 に、CCDホルダー#1、#2、#3 内のハーツラスTD-1 プラスチック飛跡検出器と TLD-MSO-S素子から得られた線量測定結果(搭載期間中の積算値)を示す。表 12-4 には比較のために、ロシア・サービス・モジュール内に設置されているロシアの電離箱R-16[89]との線量結果も示す。R-16 はD1 とD2 という 2 つの電離箱を持っており、D1 はシールドが無いもの、D2 は $\sim 0.5 \text{ g/cm}^2$  のアクリルの遮蔽で覆われている。表 12-4 ではD2 の値を示した。搭載期間の平均の線量率は  $250\sim 300 \text{ } \mu\text{Gy/day}$  と  $350\sim 600\text{ } \mu\text{Sv/day}$ であった。

表 12-4 CCD ホルダー内の線量測定結果。

Dosimetry quantity	Detector	Holder #1 71 days	Holder #2 256 days	Holder #3 446 days
Absorbed Dose	[mGy] R-16 (D2 chambers)	14.3	43.2	74.0
Total Absorbed Dose	[mGy] PADLES:	$19.8 \pm 1.0$	$58.8 \pm 1.8$	$81.0 \pm 3.4$
Total Dose Equivalent	[mSv] HARZLAS TD-1 and	$37.1 \pm 1.4$	$95.5 \pm 3.3$	$147.0 \pm 6.1$
Mean quality factor	TLD ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\cdot\text{Tb}$ )	$1.87 \pm 0.11$	$1.62 \pm 0.07$	$1.80 \pm 0.11$

### 12.1.6 白傷発生率と線量の相関

白傷発生率と線量の相関を図 12-9 に示す。本図には、今回の ISS ロシア・サービス・モジュール実験で得られた結果と、過去に STS-95 スペース・シャトル実験で得られた結果を示した。STS-95 の軌道は、高高度(～574 km)、低軌道傾斜角(28.45°)であったために、ISS 軌道に比べて捕捉陽子の線量寄与が高く、平均の線量率は今回の ISS ロシア・サービス・モジュール内の約 5.5 倍であった。しかし、図 12-9 に示されるように、白傷生成数は積算吸収線量に比例するという傾向を示した[70] [71] [73]。

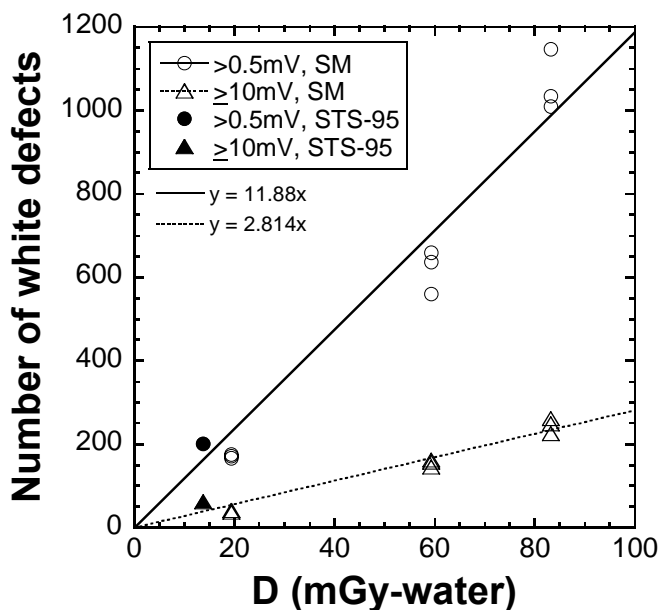


図 12-9 ロシア・サービス・モジュール(SM)と STS-95 における白傷生成数と吸収線量の相関。丸と三角のデータ点は、それぞれ出力電圧が 0.5 mV 以上と 10 mV 以上のピクセル数である。

## 12.2 マトリョーシカ・ファントム船外曝露実験

### 12.2.1 実験概要

マトリョーシカ・ファントム船外曝露宇宙実験は、宇宙飛行士の船外活動時の被ばく線量を評価するために 2004 年 1 月～2005 年 10 月に実施された、9 カ国 16 機関による国際協同宇宙実験である[90]。2 名の宇宙飛行士の船外活動により、ISS ロシア・サービス・モジュール曝露部に能動型・受動型の線量計を取り付けた人体ファントム(マトリョーシカ・ファントム)が設置された(図 12-10 参照)。

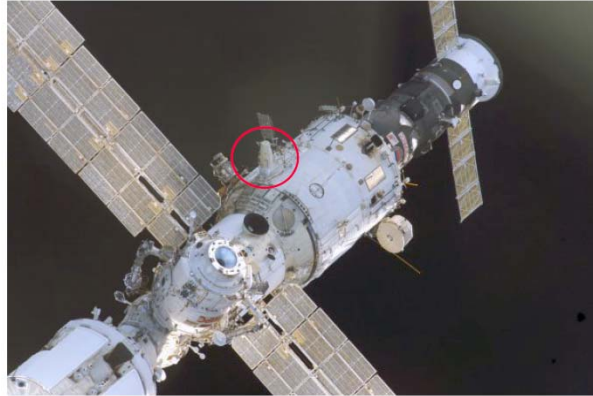
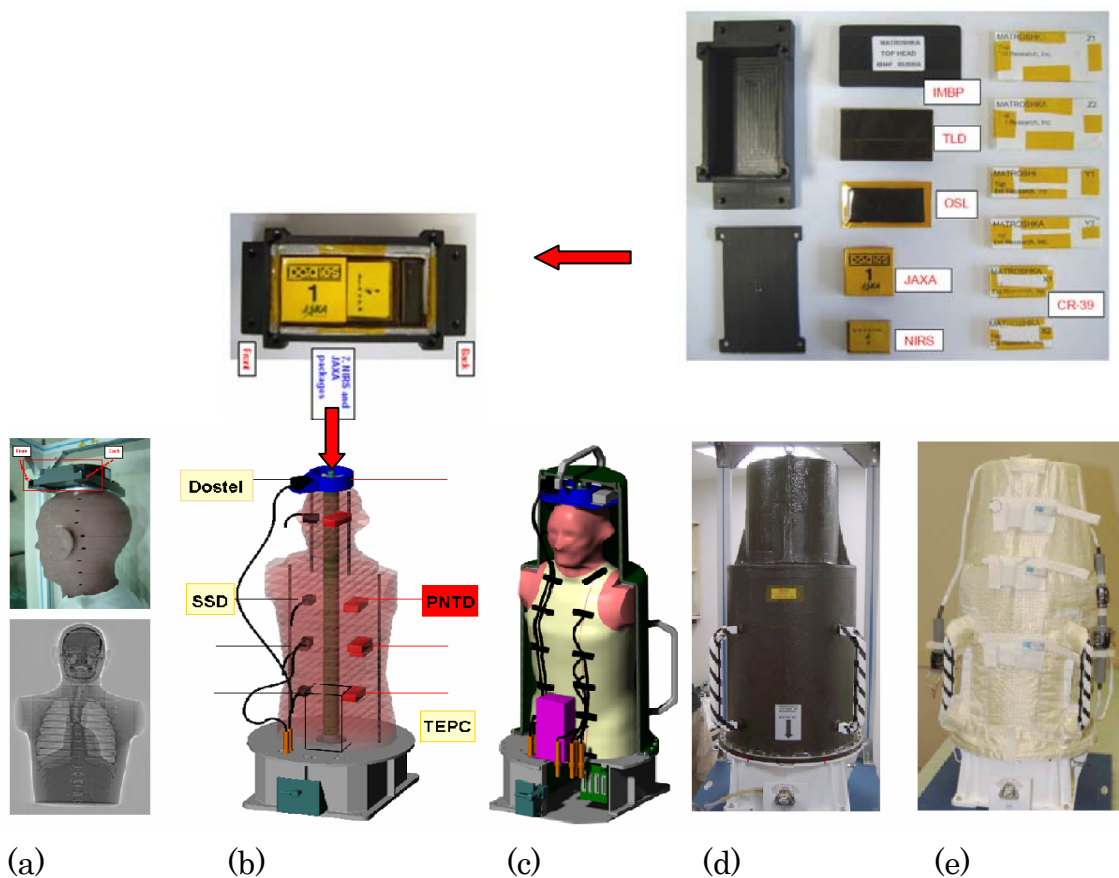


図 12-10 ISS ロシア・サービス・モジュール船外に取り付けられたマトリョーシカ・ファントム(丸印)。  
スペース・シャトル、ディスカバリーより 2005 年 8 月 6 日撮影。

### 12.2.2 マトリョーシカ・ファントム

マトリョーシカ・ファントムの構造を図 12-11 に示す。ファントム本体は成人男性の頭部から大腿部までの人体形状を模擬したもので、組織等価物質 (poly-urethane: PU)を材料とした 25mm厚の輪切り構造の板 33 枚、骨(natural bone)を使った骨格構造(脊椎、胸骨、肋骨等)とPU低密度素材で模擬した肺で構成される。ファントム内にはTLD素子(1631 本)とCR-39 が収納されている。ファントムは、ポンチョ、フードを着用しており、これらにもTLD素子(約900 個)とCR-39が収納できる。ファントムは、船外活動中の宇宙服に相当する厚さ(0.5~1g/cm<sup>2</sup>)で設計されたカーボン・ファイバー製のコンテナで覆われており、コンテナ内はドライエアが充填されている。最外層は多層断熱材のフードで覆われており、これにも 5 つのテフロン製TLD収納バッグがある。また、ファントム内部、表面、頭部には、3 種類の能動型検出器SSD (Silicon/Scintillator Device)、DOSTEL (Dosimetry Telescope)、TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter) が組み込まれた。



(a) (b) (c) (d) (e)

図 12-11 マトリョーシカ・ファントムの構造。(a)ファントム頭部及び PADLES が設置された線量計コンテナ(上)。ファントムのレントゲン断層写真(下)。(b)ファントムに取り付けられた CR-39 プラスチック飛跡検出器(plastic nuclear track detector: PNTD)及び能動型線量計(DOSTEL、SSD、TEPC)の位置。(c)ファントム外観。(d)船外活動中の宇宙服の遮蔽を模擬したコンテナ。(e)断熱材フードで覆われたファントムの外観。

### 12.2.3 PADLES 線量計

PADLES 線量計は、図 12-11 に示したファントム頭上ボックス内(70×40×30mm)に他の 5 機関の線量計とともに設置され、船外の線量計測を 621 日間(この内、曝露部搭載期間は 538 日間)行った。図 12-12 にマトリョーシカ・ファントム船外曝露実験に搭載した PADLES 線量計を示す。同じ寸法・構造の線量計を 12.2.4 節で述べる地上模擬実験に使用した。

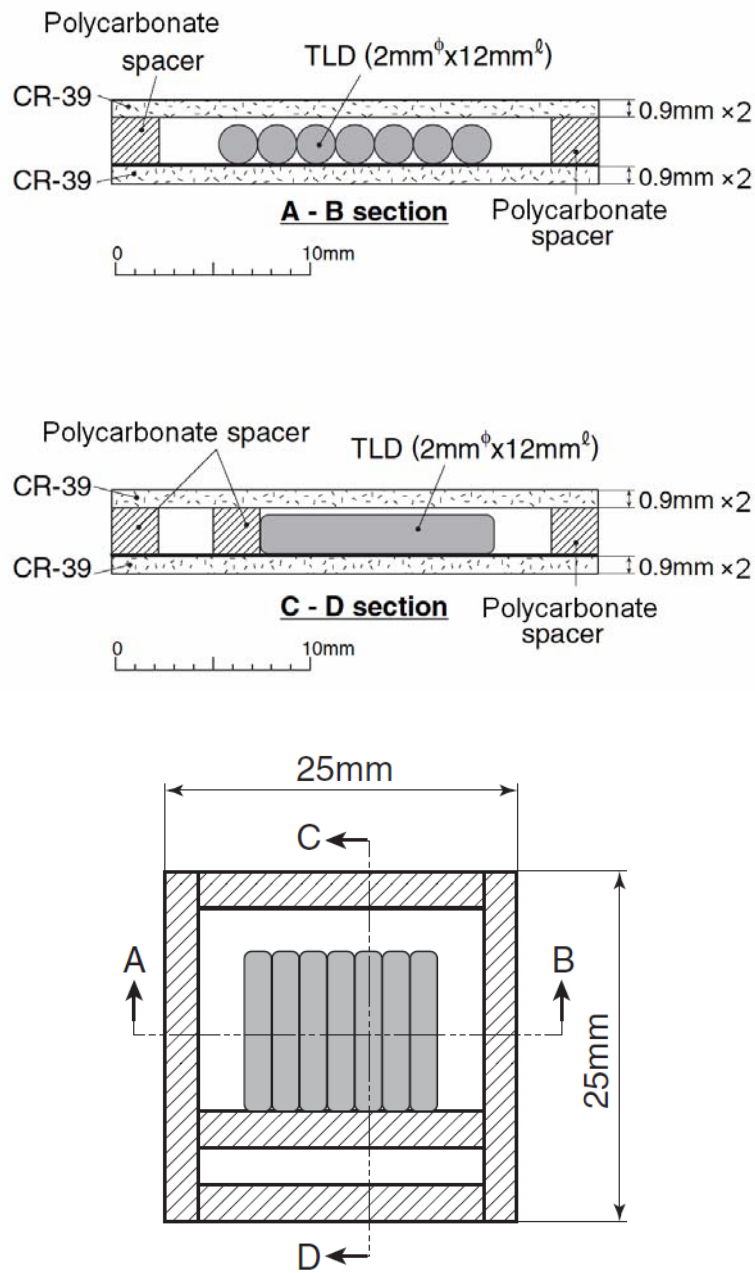


図 12-12 マトリョーシカ・ファントム船外曝露実験に搭載した PADLES 線量計。

#### 12.2.4 線量計素子感度に与える搭載温度の影響を確認する地上模擬実験

ISS 船外曝露環境は、地球からの輻射熱やアルベド光、太陽光のあたる時間が、周回軌道のズレ、ベータ角(±60 度を1年かけて変化)、自転によって複雑に変化し、搭載期間中は±70℃前後の大きな温度変化があると予測されていた(表 12-5)。このような温度環境では搭載中の CR-39 と TLD の感度のフェーディング及びエージング効果が大きいと懸念されたので、我々は、ファントム頭部に設

置された温度センサーで測定されたファントム・コンテナ内の温度データを用いて、曝露環境温度を模擬した地上模擬実験をフライト実験と並行して行った。

図 12-13 に示すように、マトリョーシカ・ファントム内部には、3 つの温度センサーが搭載されており、データは PCMCA カードに蓄積され、半年に1回のプログレス補給機によるタクシー・フライトによりデータが帰還する。4 つのセンサーのデータはロシアのコンピュータで変換されて ESA に送られ、DLR を経由して JAXA に送付された。この温度データは 10 分ごとに計測され、10 ヶ月間で約 30900 点取得された。温度センサーのデータは、ファントムが曝露環境に設置されていた 521 日間で、501 日目までデータが取得されていた。しかし、データロガーの故障のため、313 日目から数十日単位で温度データの抜けが繰り返して生じた。そのため、313 日目までの温度データを地上模擬実験に使用した。途中で温度データの抜けた期間はあるものの、501 日間の温度幅は-24.6~23.8℃、平均温度は-5.6℃であった。また、地上模擬実験に使用した温度データ 313 日間の温度幅は-24.6~21.5℃、平均温度は-6.6℃であった。実際には、ESA が熱解析で予想した温度幅よりはるかに小さかったことになる。

表 12-5 ESAの解析により予測された、ISS曝露環境に設置したマトリョーシカ内部の温度[91]。

Parameter	Specification
Temperature range (facility powered)	-20°C ... +50°C
Temperature range (facility unpowered)	-50°C ... +60°C

本実験では、のファントム頭部に設置された温度センサーの実測データ(図 12-13 参照)を用いて、TLD-MSO-S 素子とハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の感度の長期経時変化の確認を行った。センサー1で測定されたファントム・コンテナ内部の温度を再現するために、8.3.3.3 節で述べたペルチェ素子ユニットとコントローラーを改良して用いた。本実験で使用したペルチェ素子ユニットは 3 段カスケードタイプである。また、ファントム頭部に設置された温度センサーの実測データを読み込み、ペルチェ素子ユニットの試料設置部の温度を制御する専用のプログラムソフトを新たに作成した。

2004 年 4 月~2005 年 1 月までの温度センサー1(ファントム頭部)のから得られた、マトリョーシカ・ファントム表面の実測温度範囲と温度変化を図 12-14 に示す。



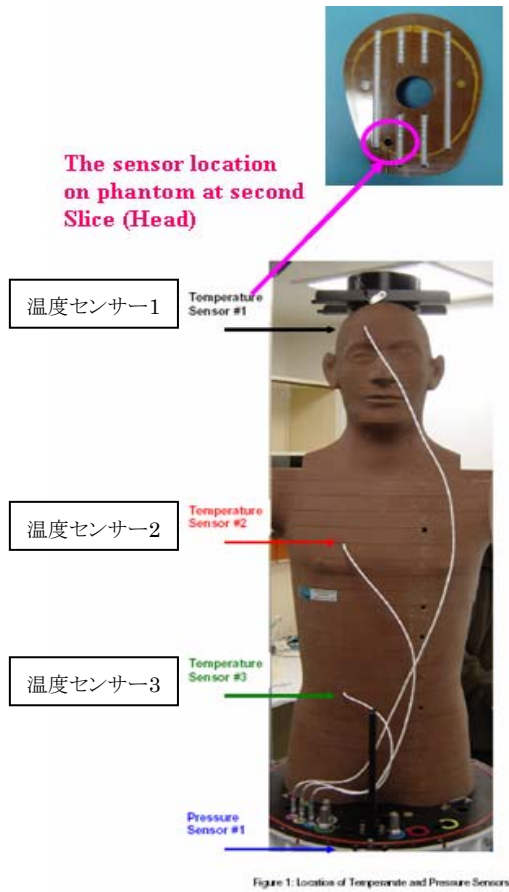


Figure 1: Location of Temperature and Pressure Sensors

図 12-13 マトリョーシカ・ファントム表面の温度センサー。

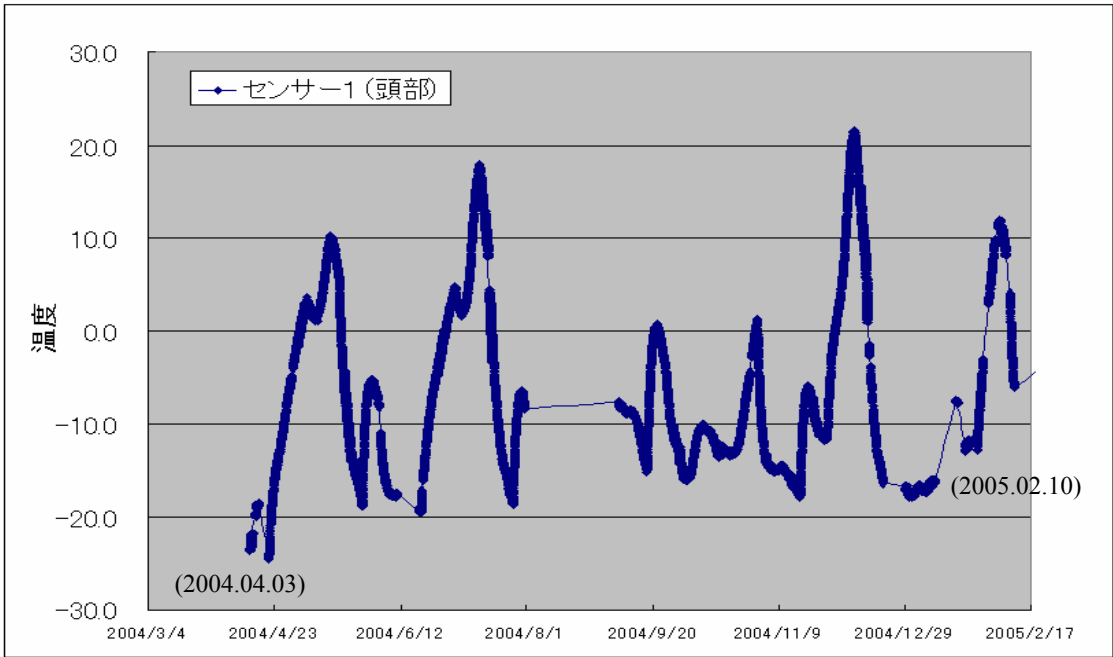


図 12-14 ファントム頭部に設置された温度センサー#1 の実測データ(約 10 ヶ月間、10 分毎に計測)。

ペルチェ素子ユニットには、搭載したPADLES線量計と同じ寸法・構造の線量計を取り付けた。宇宙放射線のかわりに、PADLES線量計には $^{252}\text{Cf}$ からの中性子線と $^{137}\text{Cs}$ からのガンマ線を照射した。図 12-15 に実験体系を模式的に示す。 $^{137}\text{Cs}$ ガンマ線はTLD-MSO-Sの線量応答の確認のため、 $^{252}\text{Cf}$ 中性子線は中性子が発生する二次重荷電粒子のエッチピットを用いてCR-39 の飛跡生成感度変化を評価するために用いた。本実験条件において、PADLES線量計の受ける吸収線量率は  $112\mu\text{Gy/day}$ と予測された。また、中性子による二次重荷電粒子のエッチピット生成率は  $30\text{ tracks/day/cm}^2$ と予測され、これは 2002 年に測定されたロシア・サービス・モジュール船内の約 1/2 のフラックスに相当した。

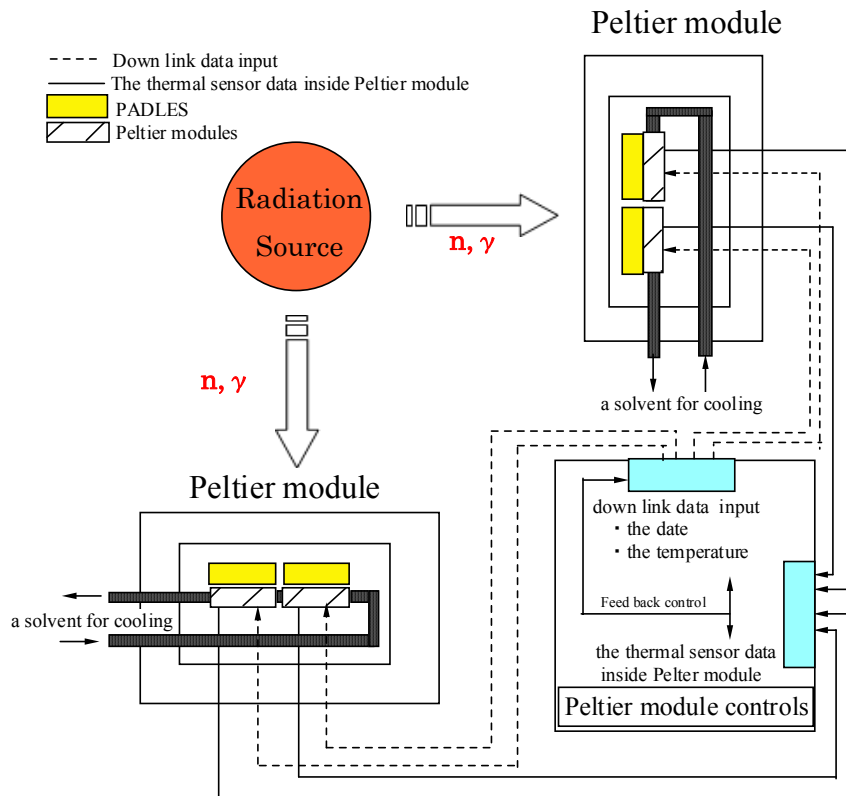


図 12-15 (上)地上模擬実験の体系。(下)3 段カスケードのペルチェ素子ユニットに設置した PADLES 線量計の写真。

本地上模擬実験で得られた TLD-MSO-S 素子の熱蛍光量の照射時間に対する変化を図 12-16 に示す。ファントム頭部内の温度環境下に置いた TLD-MSO-S 素子のフェーディング応答は、重イオン線照射で得られた室温でのフェーディング応答関数(9.4.5 節参照)によく一致した。実際の温度データは 313 日間のものしかないため、搭載期間 621 日間のフェーディング率を、重イオン線照射で得られた室温でのフェーディング応答関数で外挿して求めた。外挿の結果、621 日間のフェーディング率は 0.90 という結果が得られ、吸収線量にこのフェーディング率の逆数をかけて、船外曝露環境の吸収線量と線量当量の算出を行った。

本地上模擬実験で得られたハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器の LET 分布の経時変化を図 12-17 に示す。本図の LET 分布は、PADLES 線量計を、曝露環境温度 (DL)、室温 (RT)、0°C に最大 10 ヶ月まで保持して得られたものである。LET 分布から計算した 10keV/μm 以上の線量当量の変化を図 12-18 に示す。結果として、実際の曝露温度環境下での 10keV/μm 以上の線量当量の変化は±10%以内であった。図 12-18 のデータ点はバラツキが大きい但那原因は現在よくわかっていない。しかし、曝露温度環境での顕著な経時変化はないと判断し、ハーツラス TD-1 飛跡検出器に対しては特に補正は行わないこととした。

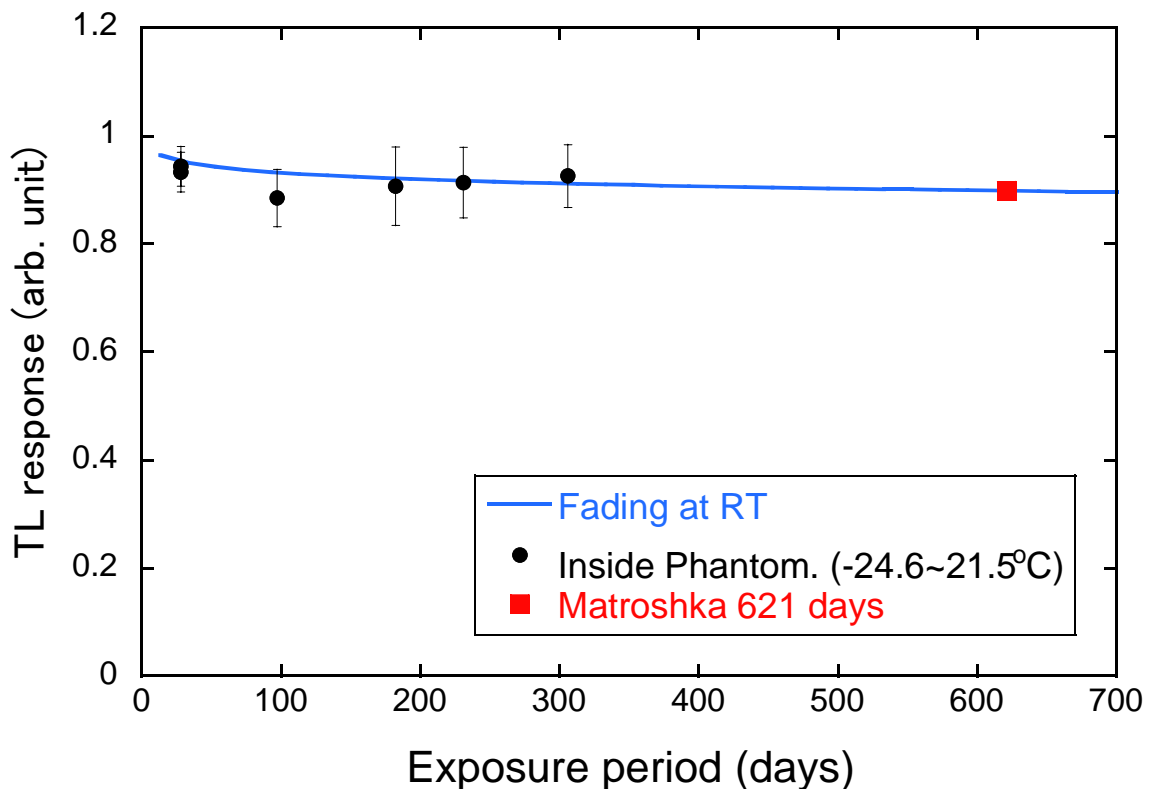


図 12-16 TLD-MSO-S 素子の熱蛍光量相対値の経過時変化。—: 重イオン線照射で得られた室温におけるフェーディング。●:マトリョーシカ・ファントム頭部の実測温度下に置いた TLD-MSO-S 素子の実測データ(地上模擬試験)。■: 重イオン線照射で得られた室温でのフェーディング応答関数を 621 日まで外挿した値。

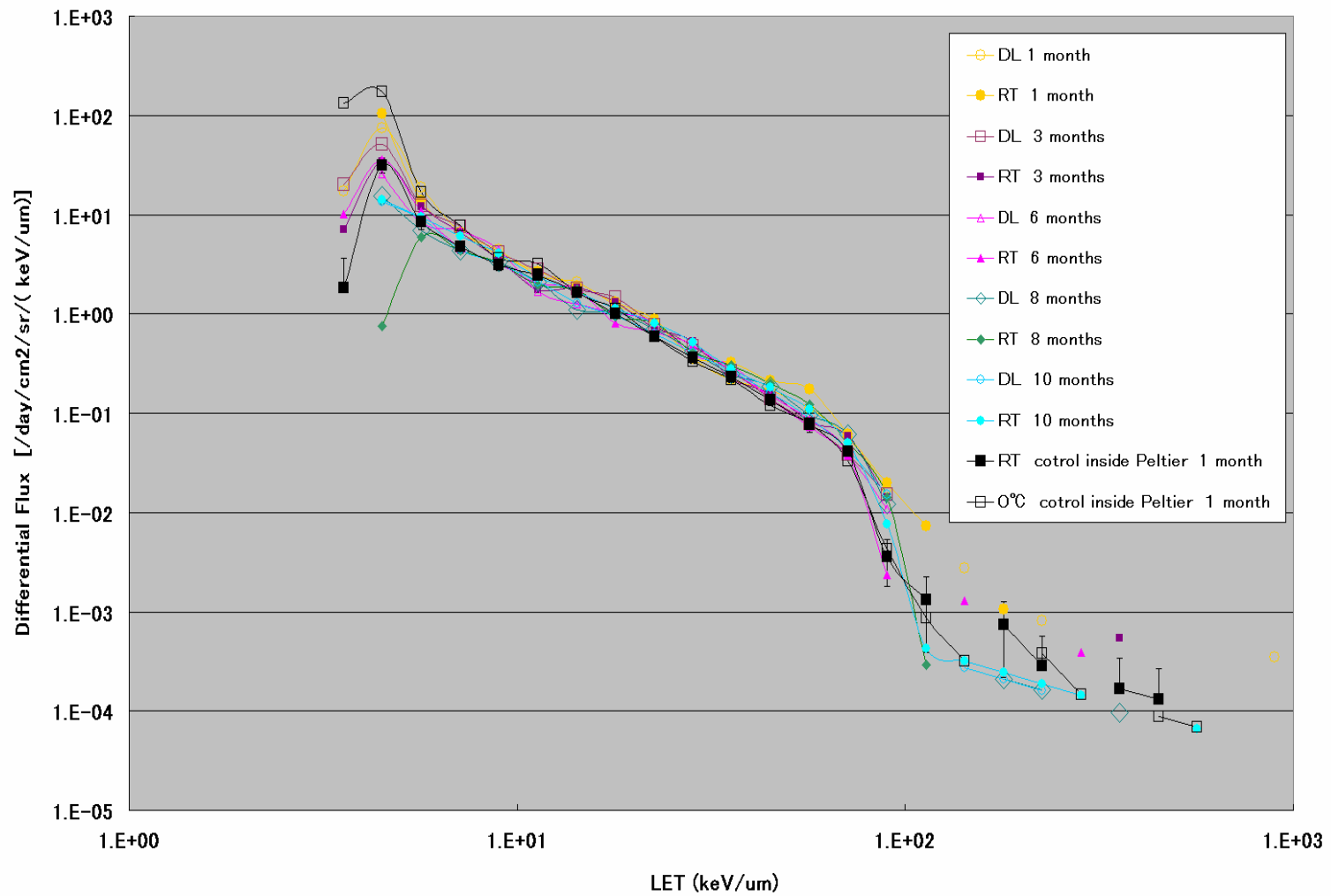


図 12-17 ハーツラス TD-1 プラスチック飛跡検出器で得られた中性子照射に対する微分 LET 分布の経過時変化。中性子線照射期間: 1 ヶ月、3 ヶ月、6 ヶ月、10 ヶ月。DL:ファントム頭部コンテナ内温度。RT:室温照射。

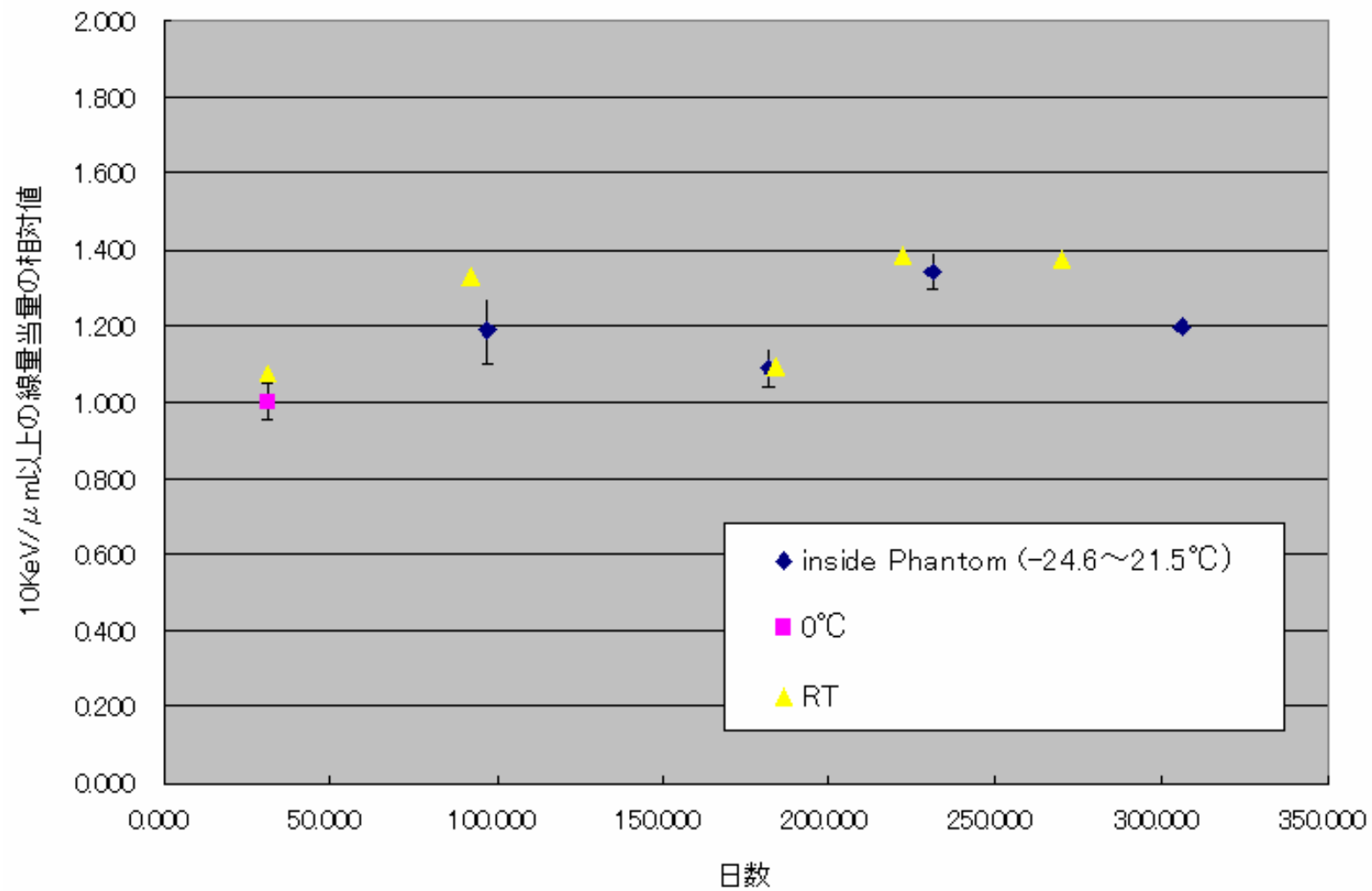


図 12-18 図 12-17 の微分 LET 分布から得られた 10keV/μm 以上の範囲の線量当量相対値の経時変化。0°C、31 日目の値を 1 としている。

### 12.2.5 船外曝露部実験

マトリョーシカ・ファントム実験では、曝露部搭載用 PADLES 線量計(1 個)、ロシア・サービス・モジュール船内コントロール用 PADLES 線量計(1 個)、及び地上コントロール用 PADLES 線量計(1 個)が使用された。曝露部搭載用 PADLES 線量計はファントム頭部コンテナ内に設置された(図 12-11 参照)。

曝露部搭載用 PADLES 線量計と船内コントロール用 PADLES 線量計は、2004 年 1 月 29 日に Progress M1-11 で ISS に運ばれ、2005 年 10 月 11 日 Soyuz TMA-6 で帰還した。ISS 軌道上の全搭載期間 621 日間であった。この内、マトリョーシカ・ファントムは、2004 年 2 月 27 日から 2005 年 8 月 18 日までの 538 日間、ロシア・サービス・モジュールの船外曝露部に設置された。それ以外の期間、すなわち 2004 年 1 月 29 日から 2 月 26 日までと、2005 年 8 月 19 日から 10 月 11 日までの合計 83 日間、曝露部搭載用 PADLES 線量計は、ロシア・サービス・モジュール船内に保管された。搭載中の ISS 軌道は、平均軌道高度は約 360km、軌道傾斜角 51.6 度である。搭載期間中の太陽活動は、23 サイクルの終期で極小期であった。

地上コントロール用 PADLES 線量計は、曝露部搭載用線量計及び船内コントロール用線量計とともに輸出・輸入され、DLR の実験室内で室温保管された。

曝露部搭載用線量計、船内コントロール用線量計及び地上コントロール用線量計で測定した LET 分布を図 12-19 に示す。ハーツラス TD-1 飛跡検出器のエッチング後の表面の代表的な画像例を図 12-20 に示す。

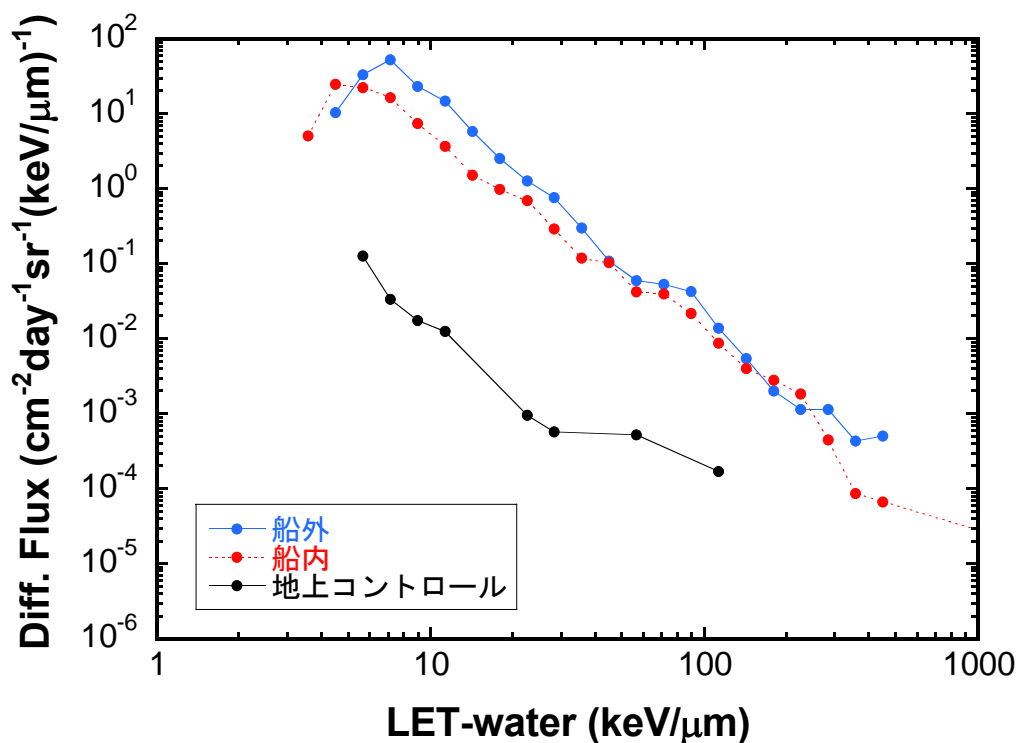


図 12-19 ISS ロシア・サービス・モジュール曝露部、船内及び地上コントロール線量計で測定した微分 LET 分布。

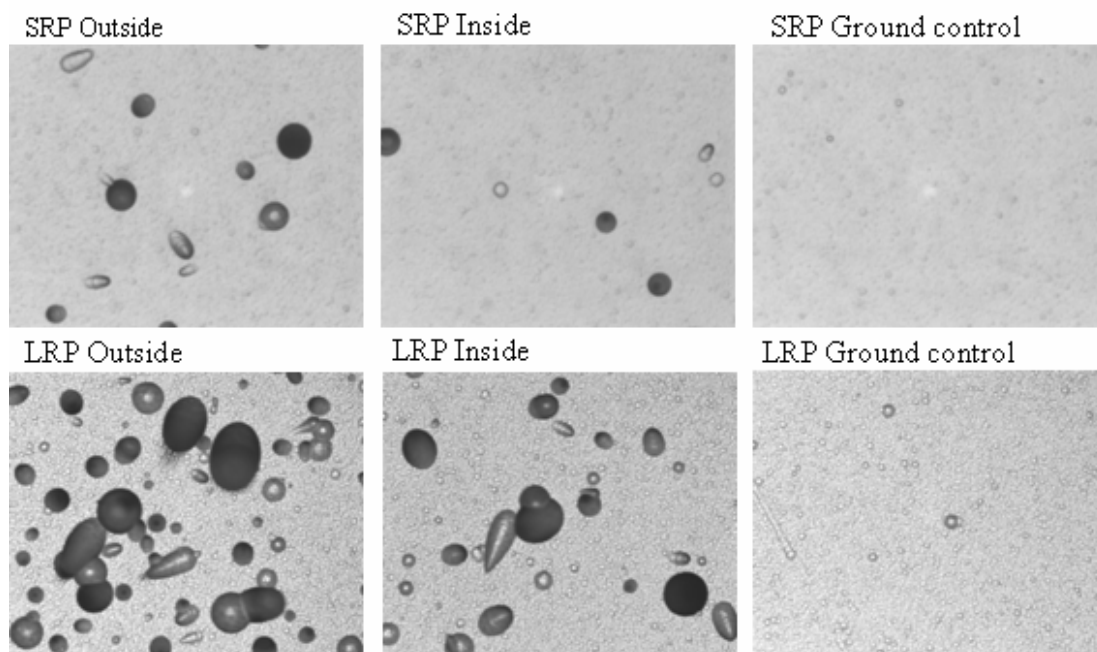


図 12-20 曝露部搭載用線量計(Outdise)、船内コントロール用線量計(Inside)及び地上コントロール用線量計(Ground control)に搭載したハーツラス TD-1 飛跡検出器のエッチング後の表面の画像の例(SRP 試料:対物レンズ 50 倍、LRP 試料:対物レンズ 20 倍)。

表 12-6 に、船外曝露部用と船内コントロール用の PADLES 線量計から得られた線量測定結果を示す。これらの線量測定結果は、地上コントロール用の線量計からバックグラウンド線量を差し引いたものである。また、ファントム頭上ボックス内の線量測定結果は、船内コントロール用線量計で測定した船内の線量結果からファントムが船内に置かれていた期間の線量を評価して差し引いたもので、曝露期間中の正味の線量を計算したものである。結果として、ISS 船外曝露部線量は約  $600\mu\text{Gy}/\text{day}$  及び約  $900\mu\text{Sv}/\text{day}$ 、ロシア・サービス・モジュール船内線量は約  $150\mu\text{Gy}/\text{day}$  及び約  $280\mu\text{Sv}/\text{day}$  と得られた。この線量結果は、同位置に搭載した他国の受動積算型線量計ともほぼ一致した。

表 12-6 ロシア・サービス・モジュール曝露部、ロシア・サービス・モジュール船内の線量測定結果。

設置場所	ファントム頭上ボックス内 (船外曝露部搭載期間中)	ロシア・サービス・モジュール内壁	船外の船内に対する比
吸収線量率 $\leq 10\text{keV}/\mu\text{m}$ [ $\mu\text{Gy}$ ]	599 ± 55	138 ± 20	4.3
吸収線量率 $>10\text{keV}/\mu\text{m}$ [ $\mu\text{Gy}$ ]	36.2 ± 1.7	13.91 ± 0.61	2.6
線量当量率 $>10\text{keV}/\mu\text{m}$ [ $\mu\text{Sv}$ ]	265 ± 18	143.5 ± 7.8	1.8
全吸収線量率 [ $\mu\text{Gy}/\text{day}$ ]	616 ± 55	152 ± 20	4.1
全線量当量率 [ $\mu\text{Sv}/\text{day}$ ]	865 ± 57	281 ± 22	3.1
平均の線質係数	1.40 ± 0.16	1.85 ± 0.28	0.76

マトリョーシカ・ファントム船外曝露実験から、次のことが明らかになった。船外のほうが平均の線質係数が小さく、船内より低 LET の粒子の線量に対する寄与が大きい。これは、船壁による電子の遮

蔽効果によるものと考えられる。船内に比べて船外では  $10\text{keV}/\mu\text{m}$  以下の吸収線量が 4.3 倍、 $10\text{keV}/\mu\text{m}$  以上の吸収線量が 2.6 倍に増加する。また、電子に加え、低エネルギー荷電粒子も遮蔽される船内に比べて、船外では全吸収線量は 4.1 倍、全線量当量は 3.1 倍ほど高いという結果になった。

### 12.3 アルトクリス遮へい効果実験

ALTCRISS (アルトクリス) 遮へい効果実験は、宇宙飛行士の睡眠居住区画(クルー・キャビン)船壁の材質について、宇宙放射線への遮蔽効果を評価するための物理計測実験である[92]。各国の能動型・受動型線量計に、クルー・キャビンで使用されているものと同じ厚さのポリエチレン・ブロック( $\text{C}_n\text{H}_n$ ,  $5\text{g}/\text{cm}^2$ )を取り付け、ISS内の様々な場所で放射線計測を行う。宇宙船内において、生物や人体への放射線影響をできる限り減少させる適切な遮蔽材とその厚さの検討をすることを目的としている。

2005 年 12 月から 2007 年 10 月まで ISS ロシア・サービス・モジュールとドッキング・コンパートメント(パース・モジュール:PIRS)にて、4回の搭載実験が実施された(phase 1: 2005 年 12 月 23 日～2006 年 4 月 9 日、107 日間; phase 2: 2006 年 4 月 24 日～2006 年 9 月 29 日、158 日間; phase 3: 2006 年 9 月 18 日～2007 年 4 月 21 日、215 日間; phase 4: 2007 年 5 月 12 日～2007 年 10 月 21 日、162 日間)。現在、phase 1 及び phase 2 実験の線量解析は終了し、phase 3 及び phase 4 実験に搭載した線量計の解析中である。

この実験で使用した PADLES 線量計には、個人被ばく線量をより正確に測定するための生体等価物質(NAN-JAERI [93] [94] [95])をラジエータとして封入し、CR-39 プラスチック飛跡検出器自身をラジエータとした場合との線量結果の比較も行った。

#### 12.3.1 実験概要

アルトクリス遮へい効果実験に使用される受動型線量計には、PADLES の他にドイツ航空宇宙研究所とナポリ大学が提供しているものがある(図 12-21 参照)。本実験で使用した PADLES 線量計の断面図を図 12-22 に示す。ハーツラス TD-1 プラスチック板 3 枚のうち1枚は、C  $290\text{MeV}/\text{n}$ , Fe  $500\text{MeV}/\text{n}$  を照射した、飛跡生成感度測定用の参照用試料である。組織等価物質 NAN-JAERI の組成を表 11-7 に示す。NAN-JAERI は、もともと中性子による人体への放射線影響評価用に作成されたもので、CR-39 プラスチックより人体組織により近い成分で構成されている。





図 12-21 アルトクリス遮へい効果実験に搭載された線量計。上:PADLES 線量計、中央:ドイツ航空宇宙研究所線量計、下:ナポリ大学線量計。

## Cross sectional view of PADLES for ALTCRISS

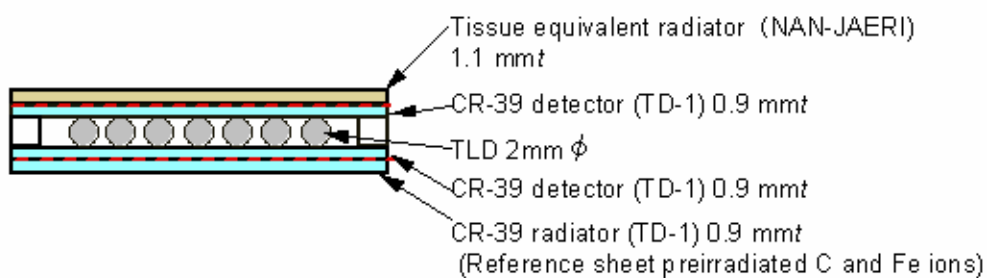


図 12-22 ALTCRISS 実験に搭載した PADLES 線量計の断面図

表 12-7 CR-39、NAN-JAERI 及び軟組織の組成。

材質	元素	含有量 (atom %)
CR-39 (ハーツラス TD-1)	H	48.6
	C	32.4
	O	18.9
NAN-JAERI	H	61.3
	C	30.2
	N	0.8
軟組織	O	7.6
	H	63.2
	C	7.4
	N	1.5
	O	27.7
	other	0.2

アルトクリス遮へい効果実験で使用される遮蔽バッグの形状を図 12-23 に示す。この遮蔽バッグは 2つのポリエチレン・ブロックからなる。遮蔽バッグは、能動型検出器の遮蔽(Sileye-3/Alteino シリコン検出器:イタリア核物理研究所)と兼用で使用されていた。そのため、ブロックの上部#1 と下部#2 に1個ずつ取り付けられている PADLES 線量計は、全方向遮蔽されていた時期( $4\pi$ )とアクティブ検出器をはさんだ遮蔽( $2\pi$ )の時期がある(図 12-23 参照)。#1、#2 の線量計と同時に、遮蔽無し of フライトコントロール用線量計#3 が、ポリエチレン・ブロックと同位置の船壁に設置された。#1～#3 の線量計がフライト中、地上コントロール線量計#4 がバイコヌール射場近傍のロスコスモス研究施設に保管された。

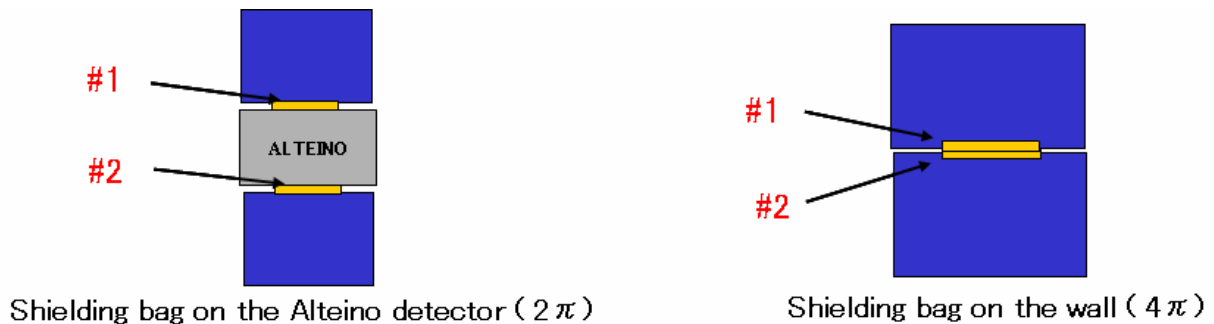


図 12-23 アルトクリス実験の遮蔽バッグ。青い部分が遮蔽用ポリエチレン・ブロック。黄色部分(#1 及び#2)が PADLES 線量計。

### 12.3.2 Phase1 実験

Phase 1 実験で、PADLES 線量計は 2005 年 12 月 23 日に Progres M-55(20P)で打ち上げられ、ロシア・サービス・モジュールに 107 日間搭載後、2006 年 4 月 9 日に Soyuz TMA-7(11S)で帰還した。搭載期間中、ポリエチレン・ブロックを兼用する能動型検出器の軌道上での移動に伴い、搭載場所が 3 箇所変わっている。2005 年 12 月 23 日～1 月 22 日(31 日間)は PIRS モジュールの Panel 302 に、2006 年 1 月 23 日～3 月 3 日(40 日間)はロシア・サービス・モジュール Panel 239、2006 年 3 月 4 日～4 月 9 日(36 日間)はロシア・サービス・モジュールの pnael 333 に設置された(図 12-24 参照)。各モジュールにおける搭載期間において、ポリエチレン・ブロックによる遮蔽の形態が異なる期間がある。Phase 1 実験において、遮蔽の形態と期間、搭載位置の関係を表 12-8 に示す。

PADLES 線量計の帰還後、C 290MeV/n, Fe 500MeV/n を照射した参照用試料で飛跡生成感度の確認を行った。ロシア・サービス・モジュールに 107 日間搭載した参照用試料のエッチング後の画像例を図 12-25 に示す。参照用試料から測定した 290MeV/n C イオンと 500MeV/n Fe イオンに対する飛跡生成感度と線量計算に使用した校正曲線を図 12-26 に示す。参照用試料で得た飛跡生成感度は校正曲線によく一致した。

ハーツラス TD-1 プラスチックをラジエータとして測定した LET 分布を図 12-27 に、NAN-JAERI をラジエータとして測定した LET 分布を図 12-28 に示す。

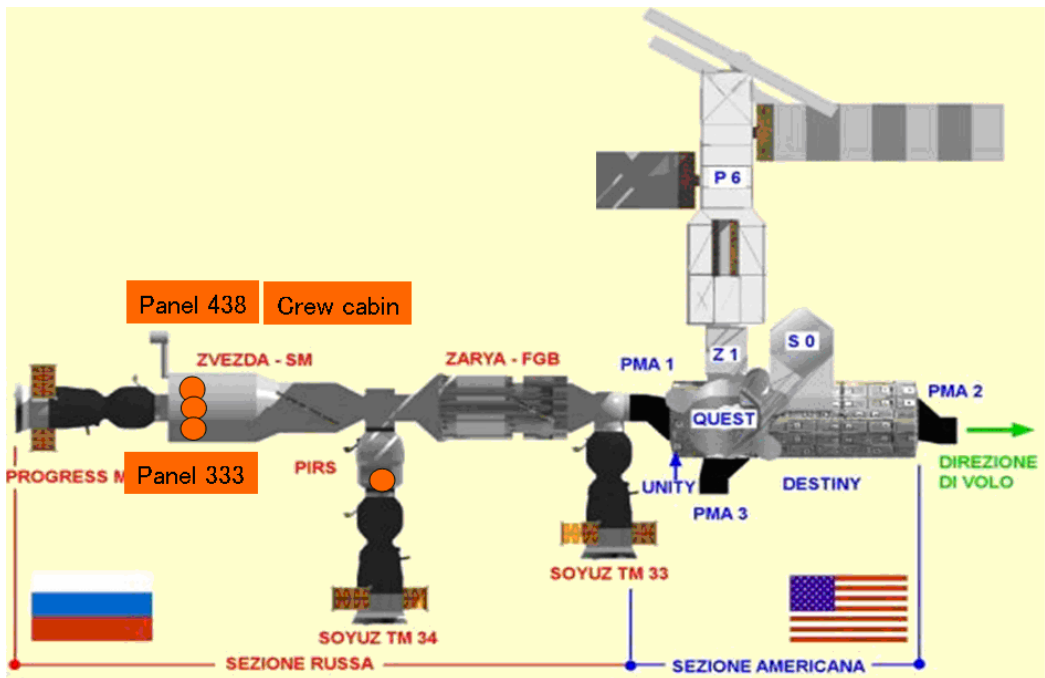


図 12-24 2005 年当時の ISS の組立図。図中のオレンジ色の丸印部分に PALDES 線量計が搭載された。

表 12-8 Phase1 実験 107 日間において、ポリエチレン・ブロックによる遮蔽が行われていた形態、期間と搭載位置。

ARTCRISS project : phase1	Pirs	Zvezda Crew cabin	Zvezda panel 333	Sub total
Shielding on the albedo ( $2\pi$ shield)	18	34	0	52
Shielding on the wall ( $4\pi$ shield)	12	33	5	50

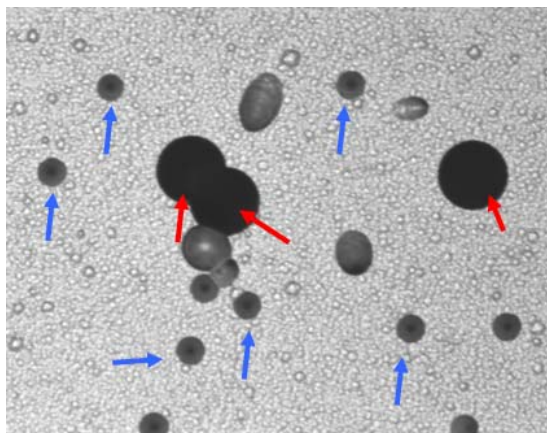


図 12-25 ALTCRIS・Phase1 実験に搭載した参照用試料のエッチング後の表面の画像の例。バルク・エッチング量  $23\mu\text{m}$ 。対物レンズ 20 倍。青矢印:  $13\text{keV}/\mu\text{m}$  C イオンのエッチピット、赤矢印:  $203\text{keV}/\mu\text{m}$  Fe イオンのエッチピット。

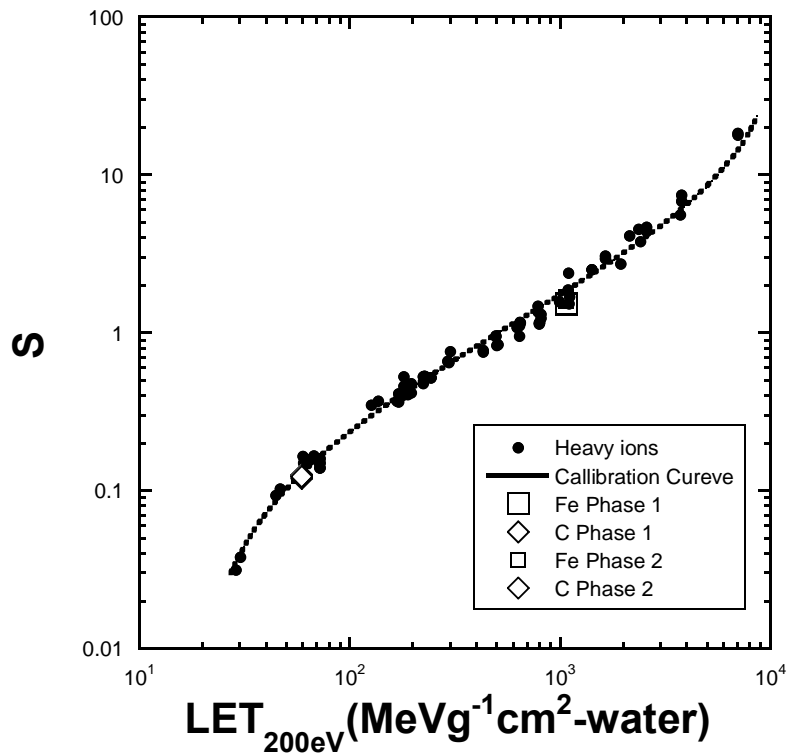


図 12-26 参照用試料から測定した 290MeV/n C イオンと 500MeV/n Fe イオンに対する飛跡生成感度と線量計算に使用した校正曲線。

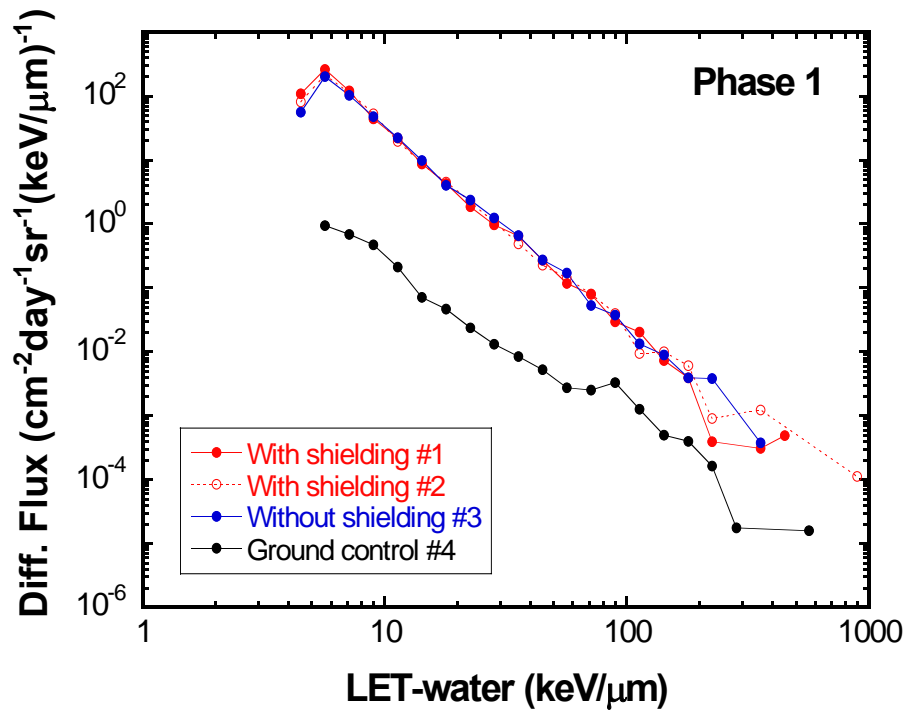


図 12-27 ハーツラス TD-1 プラスチックをラジエータとして測定した微分 LET 分布。ロシア・サービス・モジュールに 107 日間搭載し、そのうち 2π の遮蔽は 52 日間、4π 遮蔽は 50 日間。

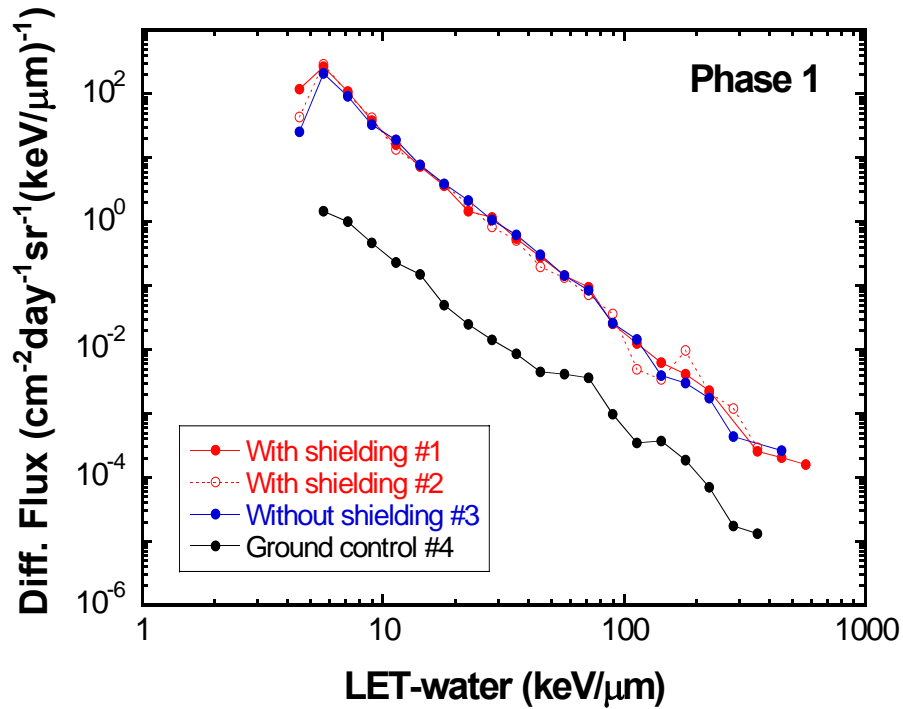


図 12-28 NAN-JAERI をラジエータとして測定した微分 LET 分布。ロシア・サービス・モジュールに 107 日間搭載し、そのうち 2π の遮蔽は 52 日間、4π 遮蔽は 50 日間。

Phase1 における PADLES 線量計の測定結果を表 12-9 に示す。吸収線量と線量当量は、遮蔽の有無にかかわらずよく一致しており、ポリエチレン遮蔽の効果がほとんどみられない。

表 12-9 Phase1 実験の線量測定結果。

パッケージ番号	1		2		3	
ラジエータ	CR-39					
遮蔽	有り		有り		無し	
吸収線量 ≤ 10keV/μm [mGy]	21.23 ±	2.02	21.44 ±	1.69	22.35 ±	1.71
吸収線量 > 10keV/μm [mGy]	5.37 ±	0.12	5.37 ±	0.21	5.77 ±	0.22
線量当量 > 10keV/μm [mSv]	32.89 ±	1.84	34.24 ±	2.21	35.26 ±	2.34
全吸収線量 [mGy]	26.60 ±	2.00	26.81 ±	1.67	28.12 ±	1.68
全線量当量 [mSv]	54.12 ±	2.92	55.68 ±	2.77	57.62 ±	2.89
平均の線質係数	2.03	0.19	2.08 ±	0.17	2.05 ±	0.16

パッケージ番号	1		2		3	
ラジエータ	NAN-JAERI					
遮蔽	有り		有り		無し	
吸収線量 ≤ 10keV/μm [mGy]	21.87 ±	2.01	22.23 ±	1.69	22.93 ±	1.71
吸収線量 > 10keV/μm [mGy]	4.71 ±	0.18	4.46 ±	0.17	5.10 ±	0.19
線量当量 > 10keV/μm [mSv]	31.61 ±	1.91	30.04 ±	2.01	31.48 ±	2.02
全吸収線量 [mGy]	26.59 ±	2.00	26.69 ±	1.67	28.04 ±	1.68
全線量当量 [mSv]	53.49 ±	2.77	52.26 ±	2.62	54.41 ±	2.64
平均の線質係数	2.01	0.18	1.96 ±	0.16	1.94	0.15

また、ラジエータの違いによる線量結果の比較を図 12-29 に示す。ラジエータとして生体組織等価物質により近い NAN-JAERI を使用しても、CR-39 プラスチック自身をラジエータとした場合に比べて、線量測定結果にほとんど差がないという結果になった。

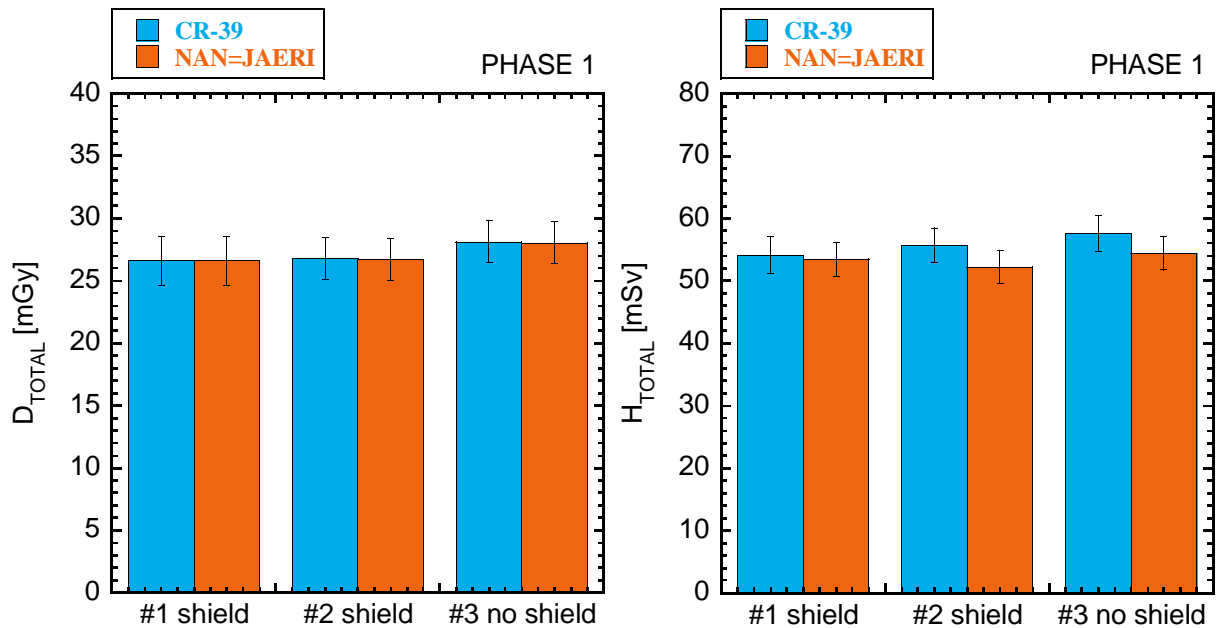


図 12-29 ラジエータ (CR-39 と NAN-JAERI) の違いによる線量結果の比較。左: 吸収線量、右: 線量当量。

### 12.3.3 Phase2 実験

Phase2 実験で、PADLES 線量計は、2006 年 4 月 24 日に Progres M-56(21P) で打ち上げられ、ISS に 158 日間搭載後、2006 年 9 月 29 日に Soyuz TMA-8(12S) で帰還した。搭載期間中、ポリエチレン・ブロックを兼用する能動型検出器の軌道上での移動に伴い、搭載場所が 3 箇所変わった。2006 年 4 月 27 日～6 月 27 日 (61 日間) ロシア・サービス・モジュールの Panel 333 に、2006 年 6 月 28 日～8 月 6 日 (36 日間) はロシア・サービス・モジュールのクルー・キャビンとその近傍、2006 年 8 月 7 日～9 月 28 日 (52 日間) はロシア・サービス・モジュールの pnael 433 に設置された。Phase 2 実験におけるポリエチレン・ブロックによる遮蔽の形態と期間、搭載位置の関係を表 12-10 に示す。

参照用試料から測定した 290MeV/n C イオンと 500MeV/n Fe イオンに対する飛跡生成感度と線量計算に使用した校正曲線を図 12-26 に示す。参照用試料で得た飛跡生成感度は校正曲線によく一致した。

ハーツラス TD-1 プラスチックをラジエータとして測定した LET 分布を図 12-30 に、NAN-JAERI をラジエータとして測定した LET 分布を図 12-31 に示す。

表 12-10 Phase1 実験 107 日間において、ポリエチレン・ブロックによる遮蔽が行われていた形態、

期間と搭載位置。

ARTCRISS project : phase2	Zvezda panel 333 and 438	Zvezda Crew Cabin	Sub total
Shielding on the alteino ( $2\pi$ shield)	52	5	57
Shielding on the wall ( $4\pi$ shield)	92	2	94

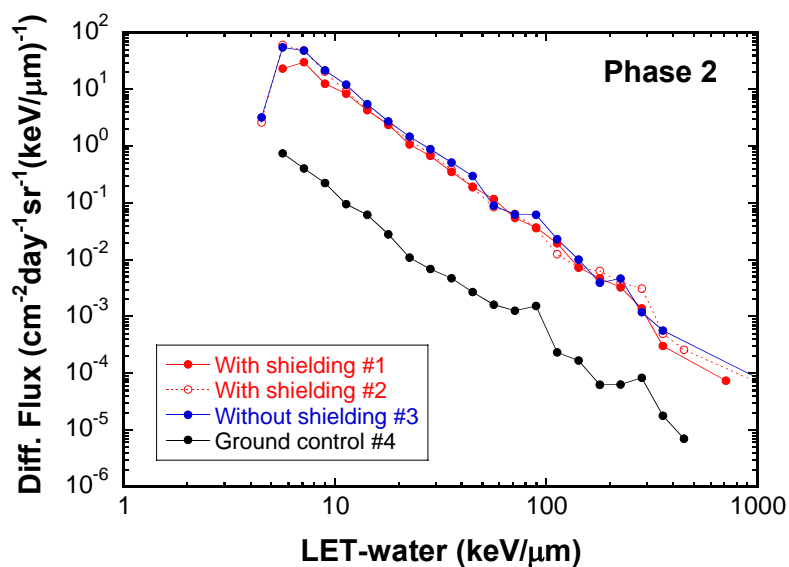


図 12-30 ハーツラス TD-1 プラスチックをラジエータとして測定した微分 LET 分布。ロシア・サービス・モジュールに 158 日間搭載し、そのうち  $2\pi$  の遮蔽は 57 日間、 $4\pi$  遮蔽は 94 日間。

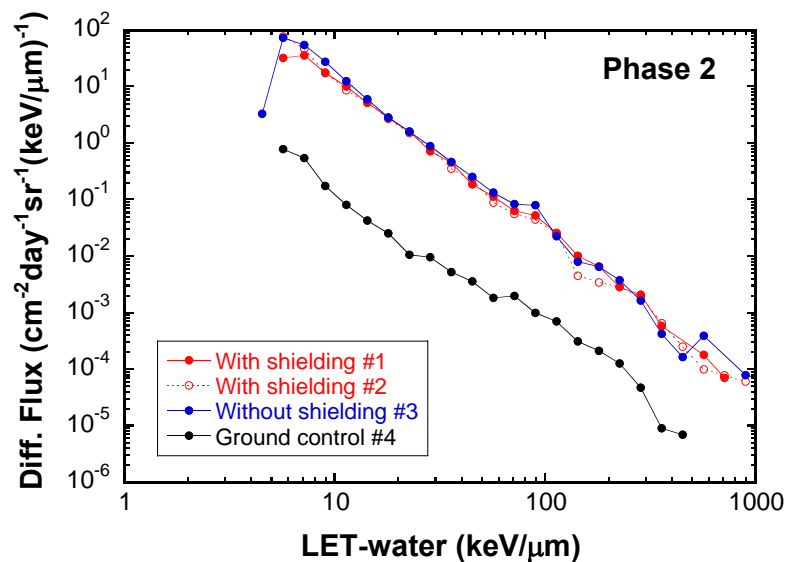


図 12-31 NAN-JAERI をラジエータとして測定した微分 LET 分布。ロシア・サービス・モジュールに 158 日間搭載し、そのうち  $2\pi$  の遮蔽は 57 日間、 $4\pi$  遮蔽は 94 日間。

Phase2 における PADLES 線量計の測定結果を表 12-11 に示す。遮蔽のある線量計が遮蔽のない軌道上コントロール線量計に比べて全吸収線量で 7~11%、全線量当量 12~22%減少した。Phase1 よりも Phase2 実験のほうが 4 $\pi$ 遮蔽の期間が長く遮蔽効果が高かったが、それでもポリエチレン遮蔽による効果はあまり大きくない。また、ラジエータの違いによる線量結果の比較を図 12-32 に示す。生体組織等価物質である NAN-JAERI をラジエータとした場合は、CR-39 プラスチック自身をラジエータとした場合に比べて、10 keV/ $\mu$ m 以上の吸収線量と線量当量がそれぞれ 6~22%、4 ~ 24%増加したが、全吸収線量と全線量当量でみるとラジエータによる差は大きくない。

表 12-11 Phase 2 実験の線量測定結果。

パッケージ番号	1		2		3	
ラジエータ	CR-39					
遮蔽	有り		有り		無し	
吸収線量 $\leq$ 10keV/ $\mu$ m [mGy]	34.13	$\pm$ 3.00	32.67	$\pm$ 1.96	35.61	$\pm$ 1.67
吸収線量 $>$ 10keV/ $\mu$ m [mGy]	4.75	$\pm$ 0.17	5.10	$\pm$ 0.20	6.21	$\pm$ 0.23
線量当量 $>$ 10keV/ $\mu$ m [mSv]	41.57	$\pm$ 2.26	44.18	$\pm$ 2.53	52.83	$\pm$ 2.82
全吸収線量 [mGy]	38.88	$\pm$ 2.99	37.77	$\pm$ 1.94	41.82	$\pm$ 1.64
全線量当量 [mSv]	75.70	$\pm$ 3.75	76.85	$\pm$ 3.19	88.44	$\pm$ 3.27
平均の線質係数	1.95	$\pm$ 0.18	2.03	$\pm$ 0.13	2.11	$\pm$ 0.11

パッケージ番号	1		2		3	
ラジエータ	NAN-JAERI					
遮蔽	有り		有り		無し	
吸収線量 $\leq$ 10keV/ $\mu$ m [mGy]	33.34	$\pm$ 3.00	32.41	$\pm$ 1.96	35.31	$\pm$ 1.67
吸収線量 $>$ 10keV/ $\mu$ m [mGy]	5.79	$\pm$ 0.20	5.39	$\pm$ 0.21	6.74	$\pm$ 0.27
線量当量 $>$ 10keV/ $\mu$ m [mSv]	51.69	$\pm$ 2.53	45.73	$\pm$ 2.50	59.67	$\pm$ 3.28
全吸収線量 [mGy]	39.12	$\pm$ 2.99	37.79	$\pm$ 1.94	42.04	$\pm$ 1.64
全線量当量 [mSv]	85.03	$\pm$ 3.92	78.14	$\pm$ 3.17	94.98	$\pm$ 3.67
平均の線質係数	2.17	$\pm$ 0.19	2.07	$\pm$ 0.14	2.26	$\pm$ 0.12



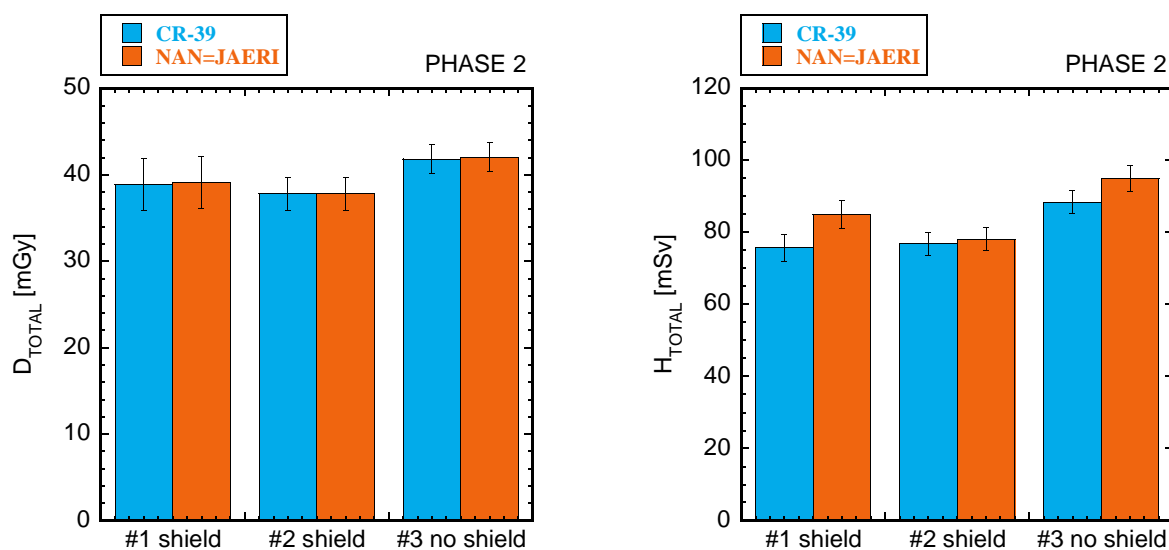


図 12-32 ラジエータ (CR-39 と NAN-JAERI) の違いによる線量結果の比較。左: 吸収線量、右: 線量当量。

#### 12.3.4 Phase1 及び Phase2 実験のまとめ

Phase1 及び Phase2 実験で得られた線量測定結果は、クルー・キャビンの船壁に相当する厚さの遮蔽材 (ポリエチレン  $5\text{g}/\text{cm}^2$ ) による宇宙放射線に対する遮蔽効果はあまりないことを示した。

両方の実験において、NAN-JAERI をラジエータとして使用した LET 分布測定では、CR-39 プラスチック自身をラジエータとした場合より  $100\sim 200\text{KeV}/\mu\text{m}$  の領域で粒子フラックスがわずかに大きくなった。これは、NAN-JAERI 中の酸素の組成比が、CR-39 プラスチックよりも大きいことに起因と考えられる。しかし、NAN-JAERI をラジエータとして使用した場合の全吸収線量と全線量当量における増加はわずかで、測定誤差 (統計誤差) の範囲以内に留まる。従って、これまでどおり CR-39 プラスチック自身をラジエータとしても宇宙放射線計測が十分可能であることが分かった。

## 第13章 今後の展望と課題

### 13.1 PADLES 線量計を使った日本の実験モジュール「きぼう」での放射線計測実験

ISSにおける宇宙放射線計測として、PADLESを使った 5 つの実験が今後実施される予定である [96、97]。

#### 13.1.1 AreaPADLES によるエリア・モニタリング

AreaPADLES 線量計は、2008 年 5 月 STS-123 で「きぼう」船内に搭載され放射線場のモニタリングを開始する。「きぼう」打ち上げ前に、船内の定点 12 箇所にモニタリング場所を示すロケーション・コードを記載したデカールと AreaPADLES 設置用のベルクロ・テープが設置された。図 13-1 に示すように、PADLES パッケージはテザーがついたポリカーボネート製のケースに封入され、ケース裏側に貼ったベルクロ・テープで、船壁に取り付けられる形状になっている。ケースのテザーは、船壁側のベルクロ・テープの丸環に引っかけて固定することができる。「きぼう」船内のモニタリング場所を図 13-2 に示す。



図 13-1 AreaPADLES 線量計の日本実験モジュール「きぼう」船壁への設置イメージ。左:デカール。右:AreaPADLES 線量計。

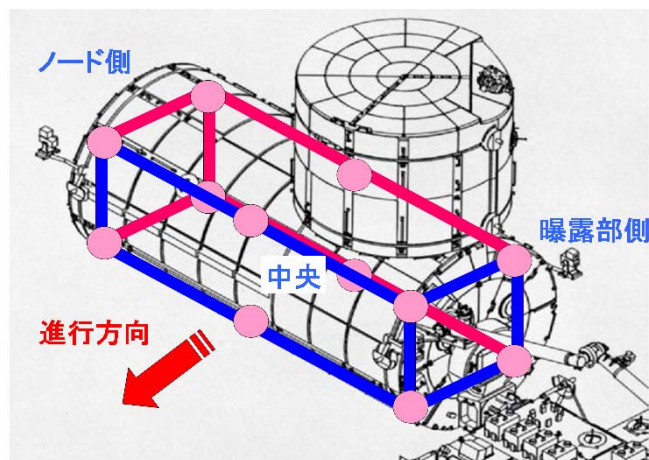


図 13-2 AreaPADLES 線量計の日本実験モジュール「きぼう」内での設置箇所(丸印)。

ISS 運用中、AreaPADLES は約 6~8 ヶ月おきに交換され、地上回収後に解析を行う。継続的に実施する定点モニタリングの結果は、ISS 船内宇宙放射線環境データベース(PADLES データベース)として、JAXA ホームページ内で一般に公開し、有人宇宙技術開発に有効活用する予定である。これによって、例えば、「きぼう」船内で行う宇宙実験テーマの提案者に実験計画立案のための放射線環境情報を提供することが可能となり、また、宇宙飛行士の長期滞在における宇宙放射線のリスク評価に役立つと期待される。

### 13.1.2 BioPADLES による生物試料被ばく線量測定

BioPADLES 線量計は、国際公募テーマや一次選定テーマ公募で採択されたライフサイエンス実験の研究者からの依頼を受けて搭載される。この線量計は生物試料の被ばく線量を試料のごく近傍で測定するために、生物試料とともに幅広い温度環境(冷凍庫-80℃から細胞培養装置+37℃)で運用される(図 13-3)。AreaPADLES と同様に、計測結果は PADLES データベースとして一般に公開される。

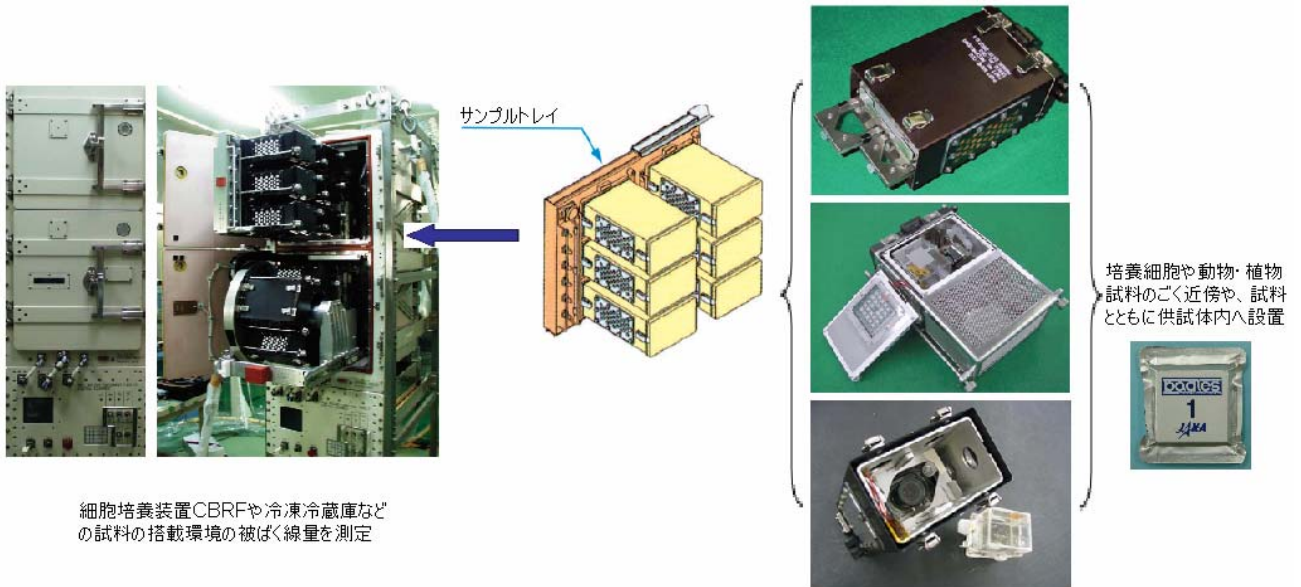


図 13-3 BioPADLES 線量計の搭載箇所。

### 13.1.3 CrewPADLES による宇宙飛行士の個人被ばく線量計測

CrewPADLES 線量計(図 13-4)は ISS 搭乗宇宙飛行士の被ばく管理を行うための個人被ばく線量計である。宇宙飛行士は、船内・船外活動を通してフライト期間常時携帯する。

CrewPADLES 線量計は、JAXA のアジア国際協力の下で 2007 年 10 月 ISS に搭乗したマレーシアのシェイク・ムザファ・シュコア(Sheikh Muszaphar Shukor)宇宙飛行士により初めて携帯された。2008 年には、「きぼう」の搭載と同時に、土井、星出宇宙飛行士をはじめ 4 人のアジア人宇宙飛行士の個人被ばく線量計として使用された。今後、ISS への長期滞在日本人宇宙飛行士の個人被ばく線量計として、被ばく管理のために継続して使用される予定である。



図 13-4 CrewPADLES 線量計。PADLES パッケージをストラップ付きポリカーボネート製のケースに納め、軌道上で宇宙飛行士が携帯しやすい形状になっている。

#### 13.1.4 DosimetricPADLES による国際協力実験

PADLES を用いた ISS パートナー国との国際協同実験としてマトリョーシカ宇宙実験、アルトクリス宇宙実験、線量計相互比較宇宙実験、線量計相互比較地上加速器実験等に参加する予定である。

#### 13.1.5 ExpPADLES による技術開発実験

3.6.2 節において、宇宙放射線の方向依存性について述べた。ハイビジョン・カメラ (High Definition TeleVision: HDTV) の ISS 搭載において、できる限り HTDV 用 CCD 素子の白傷発生を抑えるような搭載方法、搭載位置を検討したいという要求が高い。図 15-5 に示すように、PADLES 線量計を 6 面に配した立方体形状の線量計 (ExpPADLES) を「きぼう」与圧補給部に 2009 年に搭載・設置し、粒子フラックスや吸収線量の入射方向依存性について調べる予定である。



図 13-5 宇宙放射線の方向依存性を測定するための ExpPADLES 線量計。

### 13.2 今後の展開:PADLES 線量計を使った月面有人活動に向けた取り組み

2020 年以降、月・火星における有人滞在ミッションが開始される。1960 年代、月面着陸を含むアポロミッションにおいて、TLD 熱蛍光線量計や原子核乾板等による月面環境の宇宙放射線計測が

実施されているが、TLD 熱蛍光線量計は人体や生物への影響が高い高 LET 成分に対しては感度が減少する等の問題があり、月面の宇宙放射線計測結果は十分な精度で得られているとはいえない。

月の周回軌道や月面の宇宙放射線場は、ISS やスペース・シャトルが飛行する低地球軌道における宇宙放射線環境と大きく異なることが予測される。地磁気圏外における有人活動において、宇宙放射線は人体・生物への影響が大きく、低地球軌道に比べ、有人滞在ミッションの成否に対してより大きな影響を与える存在となる。

月面における次世代有人ミッションを安全に遂行するためには、ISSでの宇宙放射線計測と同様に、宇宙飛行士が携帯する個人線量計や月居住モジュール内の定点モニタリング線量計、月面船外活動用アラームメータ等が必要となると想定される。適切な遮蔽がされた月居住モジュールや、打ち上げから帰還までの個人線量計には、PADLES線量計が十分有効である。しかし、PADLES線量計には宇宙でリアルタイムに計測できず、地上帰還後にJAXA実験室で線量解析するというデメリットがある。月面環境を十分計測でき、有人活動のための「LET」が測定できる線量計、さらには月面滞在者の被ばく管理を行うためには、いくつかの能動型線量計と受動型線量計を組み合わせる必要がある。高LET領域も線量計測も精度良く達成できる軌道上で読み出し可能な受動型線量計の開発も必要である。

## 第14章 まとめ

有人宇宙開発において、被ばく線量計測は最も重要な有人技術のひとつである。宇宙飛行士のフライト当たりの滞在日数や生涯搭乗日数は被ばく量で制限されるので、精度の高い宇宙放射線計測が求められる。また、長期宇宙滞在のリスク評価や遮蔽設計、飛行計画策定のためにも精度の高い被ばく線量測定データの蓄積が必要である。

種々の線質の異なる放射線が混合する宇宙放射線場における生物放射線影響実験や宇宙飛行士の被ばく管理のためには、放射線場の LET 分布の測定が必要とされる。また、生物試料や人体内で発生する二次重荷電粒子の寄与も含めた LET 分布を測定するには、組織等価線量計が必要である。

宇宙飛行士の個人被ばく管理のためには、LET 分布から線質係数を考慮して線量当量を評価することが必要不可欠である。また、生物種毎の正確な放射線影響を議論するには、生物試料の種類や組織、着目する生物効果によって異なる生物学的効果比 (RBE) 考慮して被ばく線量評価をするべきである。しかし、RBE についてはまだデータの蓄積が少ない。今後の放射線生物影響研究分野での精力的な取り組みが待たれる。

本研究では、TLD-MSO-S 素子とハーツラス TD-1 固体飛跡検出器を組み合わせた受動・積算型の線量計 PADLES とその解析システムを開発した。PADLES は、宇宙放射線中の高 LET 成分の LET 分布を測定できる組織等価線量計である。

PADLES 線量計は、有人宇宙開発に必要な線量計測データ(吸収線量、線量当量、平均の線質係数)を測定可能で、電源や軌道上でのメンテナンスが不要、クルータイムを最小限にしか必要としないため搭載・運用の負担が少ない等の利点を持つ。米国、ロシア、欧州でも PADLES 線量計と同様の線量計測原理を持った受動型線量計が取り入れられ始め、現行の ISS での受動型被ばく線量計測手段の主流となってきている。

PADLES 線量計の解析手法を確立するために、本研究ではガンマ線や陽子線、重イオン線による照射実験を精力的に行い、これら地上実験で取得した素子の特性データを詳細に検討した。また、宇宙からの帰還後に迅速に線量計測結果を得ることができ、また長期運用に耐えるような、TLD 素子管理システム、CR-39 プラスチック飛跡検出器の自動解析システム、線量自動計算ソフトウェア等を開発・整備した。

本研究の成果により、PADLES 線量計が実用化され、ISS での本格的な線量計測の長期運用が可能となった。

## 謝 辞

指導教官である、高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター 俵 裕子準教授には線量計の開発、地上実験、宇宙実験、博士論文の作成等、研究全般にわたりご指導・ご助言をいただきました。また、早稲田大学・道家忠義先生には、PADLES の原型となる TLD と CR-39 プラスチック飛跡検出器を組み合わせた線量計を立ち上げられた創始者として開発研究全般にわたってご助言をいただきました。日本大学の小倉先生には、CR-39 プラスチック飛跡検出器の研究全般にわたってご助言をいただきました。青森大学の藤井先生には、HTDV・CCD 放射線損傷実験においてトラッキング手法についてのご助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。また、PADLES 開発研究のグループ・メンバーである AES 熊谷秀則氏には、実験全般にわたり支援いただきました。放射線医学総合研究所 基盤技術開発研究室の安田仲宏研究員、内堀幸夫研究員には、ICCHIBAN Project 実験、Space Intercomparison 実験における実験主催者として、また共同研究者として支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

重イオン照射実験は、NIRS-HIMAC 共同利用研究プロジェクト(NIRS-HIMAC;12P095, 12P104, 13P127)の一環として行いました。HIMAC 関係者のご助力に深く感謝します。

宇宙航空研究開発機構(旧 宇宙開発事業団)には、機構の開発員として PADLES の技術開発と搭載化を担当しながら、博士課程への進学に理解をいただき、線量計の軌道上搭載の実験機会を与えていただきました。ここに、深く感謝いたします。

## 引用文献

- [1] T. Doke, T. Hayashi, S. Nagaoka, K. Ogura, R. Takeuchi, “Estimation of dose equivalent in STS-47 by a combination of TLDs and CR-39”, *Radiat. Meas.* **24**, 75-82 (1995).
- [2] K. Ogura, T. Doke, T. Kasuya, K. Kuwahara, M. Matsushima, S. Nagaoka, H. Ohnishi, T. Takahashi, H. Yamada, F. Yatagai, “ Determination of high LET cosmic particles’s trajectories for space radiobiological studies”, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **22**, 1-4, 733-738 (1993).
- [3] E. R. Benton, Y. Uchibori, H. Kitamura, N. Yasuda, “The intercomparison of cosmic rays with heavy ion beams at NIRS (Icchiban) project”, presented at 7th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, San Francisco, U.S.A. (2003).
- [4] Y. Uchibori, E. R. Benton, “Resuluts from the first two InterComparison of dosimetric instruments for Cosmic radiation with heavy Ions Beams at NIRS (ICCHIBAN-1&2) Experiments”, National Institute of Radiological Science HIMAC-078 (2004).
- [5] Y. Uchibori and E. R. Benton, “Results from the two InterComparison of dosimetric instruments for Cosmic radiation with heavy Ions Beams at NIRS (ICCHIBAN-3&4) Experiments”, National Institute of Radiological Science HIMAC-128 (2007).
- [6] N. Yasuda, Y. Uchibori, E. R. Benton, H. Kitamura, K. Fujitaka, “Results from Passive Detector Intercomparisons made during the ICCHIBAN-2 Experiment and Current Status of the ICCHIBAN-4 and Proton ICCHIBAN Experiments”, *Radiat. Prot.* **120**, 1-4, 414-420 (2006).
- [7] ICRP, Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 26, *Annals of the ICRP* **1**, No.3, Pergamon Press, New York (1977).
- [8] ICRP, Recommendations of the international commission on radiolozical protection. ICRP Publication 60, *Annals of the ICRP* **21**, Nos. 1-3, Pergamon Press, New York (1991).
- [9] J.A. Simpson, in “Composition and Origin of Cosmic Rays”, ed. M.M. Shapiro, NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences, 107, Reidel, Dordrecht (1983).
- [10] G.D. Badhwar, “The radiation environment in low-Earth orbit”, *Radiat. Res.* **148**, S3–S10 (1997).
- [11] 京都大学 大学院理学研究科附属天文台 太陽磁場活動望遠鏡 (SMART), <http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/topics/cycle24/index.html>.
- [12] NASA solar physics, The Sunspot Cycle, <http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>.
- [13] R. Reedy, in “Proceedings of the National Solar Observatory/Sacramento Peak 16th International Workshop on Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances”, ed. S.L. Keil, RnN. Smart in K.S. Balasubramaniam, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* **95** (1996).
- [14] 藤高和信、“地上より高いところで受ける放射線被ばく”、*日本写真学会誌*、**67** 卷 6 号、550–555、(2004)。
- [15] G.D. Badhwar, J.E. Keith, T.F. Cleghorn, *Radiat. Meas.* **33**, 235 (2001); T.W. Armstrong, B.L. Colborn, Science Applications International Corp. Report No. SAIC-TN-9528 (1998).
- [16] H. Matsumoto, T. Goka, K. Koga, S. Iwai, T. Uehara, O. Sato, S. Takagi, “Real-time measurement of low-energy-range neutron spectra on board the space shuttle STS-89 (S/MM-8)”, *Radiat. Meas.* **33**,



- 3, 321-333 (2001).
- [17] H. Koshiishi, H. Matsumoto, A. Chishiki, T. Goka, T. Omodaka, “Evaluation of the neutron radiation environment inside the International Space Station based on the Bonner Ball Neutron Detector experiment”, *Radiat. Meas.* **42**, 1510 -1520 (2007).
- [18] D.M. Sawyer and J.I. Vette, “AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum”, Rept. NSSDC/WDC-A-R&S-76-06, National Space Science Data Center, NASA/GSFC, Greenbelt, MD (1976).
- [19] E. V. Benton, A.L. Frank, I. Csige, L.A. Frigo, E.R. Benton, “LET spectra measurements on LDEF: Variations with shielding and location”, *Radiat. Meas.* **26**, 783-791 (1996).
- [20] N. NEFEDOV, I. CSIGE, E. V. Benton, A. L. FRANK, L. A. FRIGO, E. R. Benton, “Particle directionality and trapped proton fluence of LDEF”, *Radiat. Meas.* **26**, 881-887 (1996).
- [21] E. R. Benton, E. V. Benton, A. L. FRANK, L. A. FRIGO and I. CSIGE, “Secoundry particle contribution to LET spectra on LDEF”, *Radiat. Meas.* **26**, 881-887 (1996).
- [22] 宇宙開発事業団 有人サポート委員会 中間報告 指針検討内容資料, 1999年3月.
- [23] J.I.Vette, The NASA/National Space Science Data Center Trapped Radiation Environment Model Program (1964–1991), NSSDC/WDC-A-R & S 91-29 (1991).
- [24] J. H. Hubbell, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **33**, 1269-1290 (1982).
- [25] R.E. Panel, User’s Guide to HETC Code System, Rough Draft, LANL Group X-6 (1985).
- [26] W.R. Nelson, The EGS4 code system, SLAC-265 (1985).
- [27] 船曳 他: 日本原子力学会、1998年春の年会、B45.
- [28] 船曳 他: 日本原子力学会、1998年秋の年会、D29.
- [29] V.V. Benghin, “Radiation environment onboard of the Russian segment of the ISS measured by the radiation monitoring system”, presented at 7th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Paris France (2002).
- [30] M. Golightly, “U.S. ISS Radiation Instrument Data Processing and Archiving - Status Report”, presented at 7<sup>th</sup> Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Paris France (2002).
- [31] NCRP Report No 142, “Operational Radiation Safety Program for Astronauts in Low-Earth Orbit: A Basic Framework, Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurement”, **56** (2002).
- [32] P.B. Price, R.M. Walker, “Electron microscope observation of etched tracks from spallation recoils in mica”, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 217-219 (1962).
- [33] E. Semones, M. Weyland, B. Rutledge, T. Shelfer, R. Gaza, D. Zhou, A. Johnson, N.Zapp, “Radiation Monitoring Results: Expedition 10, 11 and STS-114”, presented at 10<sup>th</sup> Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Chiba Japan (2005).
- [34] Yu.A. Akatov, V.V. Arkhangelsky, V.A. Bondarenko, V.G. Mitrikas, V.V. Tsetlin, “Some Results of Radiation Monitoring Onboard the Russian Segment of ISS (2000-2005)”, presented at 10<sup>th</sup>

Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Chiba Japan (2005).

[35] V.A. Shurshakov, “Radiation Monitoring on Board the Russian Segment of the International Space Station: Up To Date Status and Future Developments”, presented at Radiation Multilateral Health Working Group, Montreal Canada (2002).

[36] T. Berger, “DLR and ESA Human Space Dosimetry—Current experiments and the future”, presented at Radiation Detection and Dosimetry Workshop, Houston, U.S.A. (2006).

[37] I. Apathy, Yu.A. Akatov, V.V. Arkhangelsky, S. Deme, A. Kaleri, G. Reitz, “ TL dose measurements on board the Russian segment of the ISS during Expedition-7 and -8”, presented at 9th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Vienna, Austria (2004).

[38] V. A. Shurshakov et.al., “Status of the Radiation Monitoring On Board the Russian Segment Of the International Space Station”, Radiation Multilateral Health Working Group, Houston, U.S.A.. (2004).

[39] T. Doke, T. Hayashi, M. Kobayashi and A. Watanabe, “DIP angle dependence on track formation sensitivity in antioxidant doped CR-39 plates”, *Radiat. Meas.* **28**, 445-450 (1997).

[40] M. Ikenaga, I. Yoshikawa, M. Kojo, T. Ayaki, H. Ryo, K. Ishizaki, T. Kato, H. Yamamoto, R.Hara, “Mutations induced in *Drosophila* during space flight”, *Biol. Sci. Space.* **11**(4), 346-50 (1997).

[41] K. Harada, S. Nagaoka, M. Mohri, T. Ohnishi, T. Sugahara, “Lethality of high linear energy transfer cosmic radiation to *Escherichia coli* DNA repair-deficient mutants during the 'SL-J/FMPT' space experiment”, *FEMS Microbiol Lett.* **164** (1), 39-45 (1998).

[42] T. Hayashi, J. Kikuchi, N. Hasebe, S. Nagaoka, M. Kato, G. D. Badhwar, “Real time measurement of LET distribution in the IML-2 Space-Lab (STS-65)”, *Nucl. Instr. Meth.* **A365**, 524-532. (1995).

[43] T. Hayashi, T. Doke, J. Kikuchi, R. Takeuchi, N. Hasebe, K. Ogura, S. Nagaoka, M. Kato, G. D. Badhwar, “Measurement of LET distribution and dose equivalent on board the space shuttle STS-65”, *Radiat. Meas.* **26**, No. 6, 935-945. (1996).

[44] T. Hayashi, T. Doke, J. Kikuchi, T. Sakaguchi, R. Takeuchi, T. Takashima, M. Kobayashi, K. Terasawa, K. Takahashi, A. Watanabe, A. Kyan, N. Hasebe, T. Kashiwagi, K. Ogura, S. Nagaoka, M. Kato, T. Nakano, S. Takahashi, H. Yamanaka, K. Yamaguchi, G. D. Badhwar, “Measurements of LET Distribution and Dose Equivalent onboard the Space Shuttle IML-2 (STS-65) and S / MM #4 (STS-79)”, *Biol. Sci. Space.* **11**, No.4, 255-264 (1997).

[45] T. Doke, H. Tadayoshi, K. Takayoshi, J. Kikuchi, S. Nagaoka, T. Nakano ; Dose equivalents inside the MIR Space Station measured by the combination of CR-39 plates and TLDs and their comparison with those on Space Shuttle STS-79, -84 and -91 missions, *Radiat. Meas.* **35**, 5, 505-510 (2002).

[46] T. Doke, T. Hayashi, J. Kikuchi, T. Sakaguchi, K. Terasawa, E. Yoshihira, S. Nagaoka, T. Nakano, S. Takahashi, “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**, 373-387 (2001).

[47] H. Tawara, T. Doke, T. Hayashi, J. Kikuchi, A. Kyan, S. Nagaoka, T. Nakano, S. Takahashi, K. Terasawa, E. Yoshihira, “LET distributions from CR-39 plates on Space Shuttle missions STS-84 and STS-91 and a comparison of the results of the CR-39 plates with those of RRMD-II and RRMD-III

- telescopes”, *Radiat. Meas.* **35**, 119-126 (2002).
- [48] T. Ohnishi, K. Ohnishi, A. Takahashi, Y. Taniguchi, M. Sato, T. Nakano, S. Nagaok, “Detection of DNA damage induced by space radiation in Mir and space shuttle”, *J. Radiat. Res.* **43**, Suppl. S133-6 (2002).
- [49] H. Yasuda, T. Komiyama, K. Fujitaka, “Organ / Tissue absorbed doses measured with a human phantom torso in the 9th Shuttle-Mir Mission (STS-91)”, *J. J. Aerospace Env. Med.* **36**, 3, 105-112 (1999).
- [50] M. Ikenaga, J. Hirayama, T. Kato, H. Kitao, Z.B. Han, K. Ishizaki, K. Nishizawa, F. Suzuki, T.F. Cannon, K. Fukui, T. Shimazu, S. Kamigaichi, N. Ishioka, H. Matsumiya, “Effect of space flight on the frequency of micronuclei and expression of stress-responsive proteins in cultured mammalian cells”, *Radiat. Res.* **43**, Suppl. S141-147 (2002).
- [51] H. Tawara, M. Masukawa, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda, “Measurement of a Linear Energy Transfer Distribution with Antioxidant Doped CR-39 Correcting for the Dip Angle Dependence of Track Formation Sensitivity”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 7324-7327 (2008).
- [52] R.L.Fleisher, P.B. Price, R.M. Walker, *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*, University of California Press, Berkeley (1975).
- [53] R.P.Henke, E.V.Benton, *Charged Particle Tracks in Polymers*. No.3 USNRDL-TR-1102, US Naval Radiological Defense Laboratory, San Francisco (1966).
- [54] 小倉紘一、USFグループ、“Antioxidant添加CR-39の諸特性”、放射線 **13**、No.2 (1987).
- [55] K.Ogura, T. Hattori, M. Hirata, M. Asano, M. Yoshida, M.Tamada, H.Omichi, N. Nagaoka, H. Kubota, R. Katakai, “Development of copolymer of CR-39 with high sensitivity to low LET particles”, *Radial. Meas.* **25**, 159-162 (1995).
- [56] P.Christensen, L.Botter-Jensen, B.Majbornm, “Thermoluminescence dosimetry applied to radiation protection”, Riso National Laboratory, DK-4000, Roskilde, Denmark *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, **33**, 1035-1050 (1982).
- [57] 化成オプトニクス株式会社、KYOKKO TECHNICAL TLD DATA.
- [58] 俵裕子、上垣内茂樹、益川充代、永松愛子、中野完、熊谷秀則、正木道子、倉持恵美子、保田浩志、保田仲宏、“受動・積算型線量計による宇宙放射線計測技術の開発”、放射線 **27**, No.4 ,29-41(2001).
- [59] 俵裕子、益川充代、永松愛子、“積分型線量計素子CR-39/TLD による宇宙放射線線量計測”、放射線 **28**, No.2 ,181-194(2002).
- [60] A. Nagamatsu, M. Masukawa, S. Kamigaichi, H. Kumagai, M. Masaki, Y. Nakahiro, H. Yasuda, E. R. Benton, H. Takayoshi, H. Tawara, “Development of the space radiation dosimetry system ‘PADLES’”, *Proceedings of the 20th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses*, 23-36 (2006).
- [61] E.V.Benton; “A study of charged particle tracks in cellulose nitrate”, Report USNRDL-TR-68-14, US NAVAL Radiological Defense Laboratory (1968)

- [62] G. Somogyi, S. A. Szalay, "Track diameter kinetics in dielectric track detector", Nucl. Instrum. Methods **109**, 211-232 (1973).
- [63] D. Zhou; Doctoral thesis of "Radiation of Cosmic Rays and Dosimetry at aviation altitudes", University College Dublin (1999).
- [64] N. Yasuda, D.H. Zhang, S. Kodaira, Y. Koguchi, S. Takebayashi, W. Shinozaki, S. Fujisaki, N. Juto, I. Kobayashi, M. Kurano, D. Shu, H. Kawashima, "Verification of angular dependence for track sensitivity on several types of CR-39", Radiat. Meas. **43** S269-273 (2008).
- [65] H. Tawara, M. Masukawa, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda, "Measurement of a Linear Energy Transfer Distribution with Antioxidant Doped CR-39 Correcting for the Dip Angle Dependence of Track Formation Sensitivity", Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 7324-7327 (2008).
- [66] Service Agreement between the National Space Development Agency of Japan (NASDA) and Eril Research, Inc. (ERI) concerning the Research Activities by ERI for NASDA on "Analysis of NASDA CR-39 Plastic nuclear track detector exposed on the STS-95 space shuttle mission ", ERI Report No. 030103 (2003).
- [67] E. R. Benton, Doctoral thesis of "Radition Dosimetry at Aviation Altitudes and in Low-Earth Orbit", University College Dublin (2003).
- [68] N. Yasuda, M. Kurano, D. Shu, H. Kawashima, S. Kodaira, K. Ochiai, L. Sihver, "Prformance test of CR-39 plastic nuclear track detectors for thrapeutic carbon beam", NIRS Thecnology, **1**, 1-7 (2007).
- [69] 内堀幸夫, 安田仲宏, 北村尚, "宇宙放射線線量計国際比較実験Icchibanプロジェクトにおける固体飛跡検出器", 第 21 回 固体飛跡検出器学会 発表資料, 千葉 日本 (2006).
- [70] J.F. Ziegler, J.P. Biersack and U. Littmark, The Stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, New York, 1985; J. P. Biersack and L. Haggmark, Nucl. Instr. and Meth.**174**, 257, (1980). SRIM 2000 (The Stopping and Range of Ions in Matter) programs, <http://physics.nadn.navy.mil/PHYSICS/Faculty/Ziegler/home.htm>.
- [71] B. Burgkhardt, R. Herrea, E. Piesch, "Fading characteristics of different thermoluminescent dosimeters", Nuclear instruments and methods **137**, 41-47 (1976).
- [72] L.A.R. da Rosa, "The influence of temperature and humidity on the stability of the response of different thermoluminescent detectors", Part A. Applied Radiation and Isotopes **40**, 139-145 (1989).
- [73] H. Yasuda, K. Fujitaka, "Response of TLD Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>:Tb and Radiophotoluminescent glass to heavy charged particles and space radiation", Radiation Protection Dosimetry **87**, 2, 115-119 (2000).
- [ 74 ] T. Berger, M. Hajek, L. Summerer, M.Fugger, N.Vana, "The efficiency of various thermoluminescence dosimeter types to heavy ions", Radiat. Prot. **120**, 365-368 (2006).
- [75] 榎本宏子, 石樽信人, "固体飛跡検出器CR-39 におけるAgingとFadingの影響", 保健物理, **33**(4), 407-413(1998).
- [76] J.H. Hubbell, "Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients", Int. J. Appl. Radiat. Isot. **33**, 1269-1290 (1982).

- [77] Y.S. Hotowitz, O. Avila, M. Rodrigues-Villfuerte, “Theory of heavy charged particle response (efficiency and supralinearity) in TL materials”, *Nucl. Instr. and Meth, B* **184**, 85-112 (2001).
- [78] 小倉紘一、“外部環境がCR-39 に及ぼす影響－温度効果と酸素効果－”、*放射線* **13**, No.3 (1987).
- [79] N. Yasuda, K. Namiki, Y. Honma, Y. Umeshima, Y. Marumo, H. Ishii, E.R. Benton, “Development of a high speed imaging microscope and new software for nuclear 3 track detector analysis”, *Radiat. Meas.* **40**, 311- 315 (2005).
- [80] M. Sasada, T. Saito, M. Fujii, N.I. Zelentchikov, “Application of CR-39 detectors in studying the radiation damage of CCD cameras on board the MIR space station”, *Radiat. Meas.* **28**, 773-776 (1997).
- [81] M. Sasada, M. Fujii, T. Saito, Yu.D. Kotov, N.I. Zelentchikov, “CCD damaging on manned space station”, *ITE Technical Report*, **23**, No.5, 13-18, in Japanese (1999).
- [82] M.Yamauchi, J.Yamazaki, H.Watanabe, M. Mihashi, T.Andou, A.Yokota, S. Kuboyama, T.Aburaya, T. Suzuki, Y. Iwata, K. Murakami, “Space radiation effect on the high definition television camera CCD”, *ITE Technical Report*, **25**, No.75, 27-32, in Japanese (2001).
- [83] A.Yokota, S. Kuboyama, T. Aburaya, T. Suzuki, T. Andou, J. Yamazaki, T. Watanabe, M. amauchi, S. Mitsuhashi, Y. Iwata, T. Murakami, ”Study of the space radiation effect on the high definition television camera CCD”, *The 4th International Workshop on Radiation Effect on Semiconductor Devices for Space Application proceedings* (2002).
- [84] G. Hopkinson, Ch. Chlebek, “Proton damage effects in an EEV CCD imager”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **36**, 1865-1871 (1989).
- [85]G. Hopkinson, “Radiation effects on solid state imaging devices”, *Radiat. Phys. Chem.* **43**, No. 1/2, 79-91 (1994).
- [86] G. Hopkinson, “Proton effects in Charged-Coupled Devices”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.***43**, 614-627 (1996).
- [87] J. Yoshikawa, K. Murakami, A. Nagamatsu, J. Yamazaki, S. Mitsuhashi, A. Yokota, “Experiment on space radiation of HDTV Utilizing International Space Station”, *ITE Technical Report*, **31**, 43, 1-4 IST2007-78, in Japanese (2007).
- [88] A. Nagamatsu, K. Murakami, A. Yokota, J. Yamazaki, M. Yamauchi, H. Kumagai, H. Tawara, “Radiation damage to HDTV camera CCDs onboard the International Space Station”, *Radiat. Meas.*, to be submitted.
- [89] E.I. Yuryatin, V.I. Shumshurov, V.V. Fominyh, M.V. Teltsov, “Studies of dosimetric characteristics of ionization chambers with electrostatic relays”, *Ismerit. Techn.***3**, 48–53, in Russian (1979).
- [90] G.Reitz, T. Berger, P. Bilski, R. Facius, M. Hajek, V. Petrov, M. Puchalska, D. Zhou, J. Bossler, Y.Akatov, V.Shurshakov, P. Olko, M. Ptaszkiewicz, R. Bergmann, M. Fugger, N. Vana, R. Beaujean, S. Burmeister, D. Bartlett, L. Hager, J. Pálfalvi, J. Szabó, D.O’Sullivan, H. Kitamura, Y.Uchihori, N.

- Yasuda, A. Nagamatsu, H. Tawara, E. R. Benton, R. Gaza, S. McKeever, G. Sawakuchi, E. Yukihiro, F. Cucinotta, E. Semones, N. Zapp, J. Miller, J. Dettmann, “Astronaut's organ dose as inferred from measurements using a human phantom outside the ISS”, *Radiat. Meas.*, to be published..
- [91] T. Beger, “MATROSHKA Ground Based Study”, DLR Tech. Note (2004).
- [92] M. Casolino, F. Altamura, M. Minori, P. Picozza, C. Fuglesang, A. Galper, A. Popov, V. Begenin, V. M. Petrov, A. Nagamatsu, T. Berger, G. Reitz, M. Durante, M. Pugliese, V. Roca, F. Cucinotta, E. Semones, M. Shavers, V. Guarnieri, C. Lobascio, “The ALTCRISS project on board the International Space Station”, *Advances in Space Research* **40**, 1746-1753 (2007).
- [93] S. Tsuda, A. Endo, Y. Yamaguchi, “Energy Dependence of absorbed dose distribution in a soft tissue substitute for neutron dosimetry”, *Nuclear Science and Technology*, **4**, 132-135 (2003).
- [94] S. Tsuda, A. Endo, Y. Yamaguchi, “Synthesis and characterization of a Soft-tissue Substitute for Neutron Dosimetry”, *Nuclear Science and Technology*, **40**, 12, 1027-1031 (2004).
- [95] S. Tsuda, A. Endo, Y. Yamaguchi, “Development of three kinds of tissue substitutes for a physical phantom in neutron dosimetry”, **42**, 10, 877-887 (2005).
- [96] 俵 裕子、永松 愛子、“有人宇宙飛行における受動型線量計による被ばく線量測定”, *放射線* **5**, No.3, P217-241 (2008).
- [97] A. Nagamatsu, K. Murakami, S. Araki, H. Kumagai, K. Kitajo, H. Tawara, “Space radiation dosimetry in low earth orbit by a passive and integrating dosimeter— ‘PADLES’”, *RADIATION DETECTORS AND THEIR USES* (2008), to be published.

## 研究業績

### 1. 論文

- (1) 俵裕子、上垣内茂樹、益川充代、永松愛子、中野完、熊谷秀則、正木道子、倉持恵美子、保田浩志、保田仲宏、“受動・積算型線量計による宇宙放射線計測技術の開発”、放射線 **27**, No.4 ,29-41(2001).
- (2) 俵裕子、益川充代、永松愛子、“積分型線量計素子CR-39/TLD による宇宙放射線線量計測”、放射線 **28**, No.2 ,181-194(2002).
- (3) A. Nagamatsu, M. Masukawa, S. Kamigaichi, H. Kumagai, M. Masaki, N. Yasuda, H. Yasuda, E. Benton, T. Hayashi, H. Tawara, “Development of the space radiation dosimetry system ‘PADLES’”、Radiation Detectors and Their Uses, KEK proceeding 2006-7,26-36 (2006).
- (4) M. Casolino, F. Altamura, M. Minori, P. Picozza, C. Fuglesang, A. Galper, A. Popov, V. Benghin, V. M. Petrov, A. Nagamatsu, T. Berger, G. Reitz, M. Durante, M. Pugliese, V. Roca, F. Cucinotta, E. Semones, M. Shavers, V. Guarnieri, C. Lobascio, “The ALTCRISS project on board the International Space Station”, Advances in Space Research **40**, 1746-1753 (2007).
- (5) 俵 裕子、永松 愛子、“有人宇宙飛行における受動型線量計による被ばく線量測定”、放射線 **5**, No.3, P217-241 (2008).
- (6) H.Tawara, K. Eda, T. Sanami, S. Sasaki, K. Takahashi, R. Sonkawade, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, T. Doke, “Dosimetry for Neutrons from 0.25 to 15 MeV by the Measurement of LET Distributions for Secondary Charged Particles in CR-39 Plastic”, Jpn. J. Appl. Phys **47**, 7324-7327 (2008).
- (7) A. Nagamatsu, K. Murakami, A. Yokota, J. Yamazaki, M. Yamauchi, H. Kumagai, H. Tawara, “Radiation damage to HDTV camera CCDs onboard the International Space Station”, Radiat. Meas., to be submitted.
- (8) G.Reitz, T. Berger, P. Bilski, R. Facius, M. Hajek, V. Petrov, M. Puchalska, D. Zhou, J. Bossler, Y.Akatov, V.Shurshakov, P. Olko, M. Ptaszkiewicz, R. Bergmann, M. Fugger, N. Vana, R. Beaujean, S. Burmeister, D. Bartlett, L. Hager, J. Pálfalvi, J. Szabó, D.O’Sullivan, H. Kitamura, Y.Uchihori, N. Yasuda, A. Nagamatsu, H. Tawara, E. R. Benton, R. Gaza, S. McKeever, G. Sawakuchi, E. Yukihiro, F. Cucinotta, E. Semones, N. Zapp, J. Miller, J. Dettmann, “Astronaut's organ dose as inferred from measurements using a human phantom outside the ISS”, Radiat. Meas., to be published.
- (9) H. Tawara, M. Masukawa, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda: Measurement of a Linear Energy Transfer Distribution with Antioxidant Doped CR-39 Correcting for the Dip Angle Dependence of Track Formation Sensitivity, Jpn. J. Appl. Phys. **47**,7324-7327 (2008).
- (10) A. Nagamatsu, K. Murakami, S. Araki, H. Kumagai, K. Kitajo, H. Tawara, “Space radiation dosimetry in low earth orbit by a passive and integrating dosimeter— ‘PADLES’”, RADIATION DETECTORS AND THEIR USES (2008), to be published.

## 2. 学術講演会（2005年4月～2008年9月）

### 2-1. 国際会議講演

- (1) A.Nagamatsu, M.Masukawa, F.Nobuyosh, K.Murakami, T.Nakamura, H.Kumagai, H.Tawara, “Some problems to be solved for automatic analysis of a CR-39 nuclear track detector in space radiation dosimetry”, Oral presentation, The10th WRIMSS WS (Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station), 千葉(2005.9).
- (2) A.Nagamatsu, K. Murakami, H. Tawara, H. Kumagai, K. Kitajo, “Space radiation dosimetry by PADLES on an exposed area of the MATROSHKA project (phase 1)”, Oral presentation, The11th WRIMSS WS (Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station), オックスフォード(2006.9).
- (3) 小山 正人、村上 敬司、永松愛子、 “宇宙ステーション上の宇宙放射線測定におけるINFNとの研究協力JAXA-INFN cooperation on space radiation measurement on ISS, Oral presentation”, 日本・イタリア科学技術交流 特別講演素粒子・原子核物理における日イタリア科学技術協力, イタリア大使館・日本(2006.5).
- (4) A.Nagamatsu, K.Murakami, S.Araki, M.Koyama, H. Tawara, “Future activities of PADLES dosimetry in JEM docked with ISS”, Oral presentation, The12th WRIMSS WS (Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station), オクラホマ(2007.9).
- (5) A.Nagamatsu, K.Murakami, S.Araki, M.Koyama, H. Tawara, S.Tshuda, M. Casolino, H. Kumagai, K. Kitajo, “Space radiation dosimetry by PADLES in the ISS Russian segment to evaluate the effect of crew-cabin shielding (ALTCRISS Project Phase 1 and 2)”, Oral presentation, The12th WRIMSS WS (Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station), オクラホマ(2007.9).
- (6) A.Nagamatsu, K.Murakami, “Space radiation area monitoring at JEM fixed locations (Area PADLES 1)”, Increment 17 Science Symposium (2008.3).
- (7) A.Nagamatsu, K.Murakami, “Space radiation area monitoring at JEM fixed locations (Area PADLES 2)”, Increment 18 Science Symposium (2008.7).
- (8) A.Nagamatsu, K.Murakami, S.Araki, Kumagai, K. Kitajo, H. Tawara, “Space radiation dosimetry by PADLES on an exposed area of the MATROSHKA project (phase 2A)”, Oral presentation, The13th WRIMSS WS (Workshops on Radiation Monitoring for the International Space Station), クラコフ(2008.9).

### 2-2. 国内会議講演

- (1) 永松愛子、益川充代、藤本信義、俵裕子、熊谷秀則、 “宇宙放射線計測システムPADLESの開発”、第20回放射線検出器とその応用、つくば(2006.2).
- (2) 永松愛子、益川充代、藤本信義、村上敬司、中村泰、熊谷秀則、俵裕子、 “マトリョーシカプロジェクトのための地上追従実験の解析結果について”、第20回固体飛跡検出器研究会、千葉(2006.3).



- (3) 熊谷秀則、永松愛子、村井正、矢部志津、小平聡、宮澤義典、北城圭一、俵裕子、安田仲宏、“雰囲気(湿度・酸素分圧)によるCR-39の感度への影響”、第20回固体飛跡検出器研究会、(2006.3).
- (4) 俵裕子、道家忠義、熊谷秀則、永松愛子、安田仲宏、“速中性子線量計測を目的としたCR-39個人被ばく線量計の高速自動解析システム”、第20回固体飛跡検出器研究会、千葉(2006.3).
- (5) 村井正、矢部志津、永松愛子、俵裕子、熊谷秀則、宮澤義典、北城圭一、小平聡、安田仲宏、“宇宙放射線個人被ばく線量計測におけるCR-39感度の酸素分圧影響評価Ambient Oxygen Pressure Effect to CR-39 Sensitivity for Astronauts Radiation Dosimetry”(課題番号:17P205)、2002年度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報告会、千葉(2006.4).
- (6) A. Nagamatsu et al., “Radiation monitoring device in JAXA’s Life science experiment system for ISS”、第25回宇宙技術および科学の国際シンポジウム(ISTS)、金沢(2006.4).
- (7) 永松愛子、俵裕子、熊谷秀則、北城圭一、“PADLESによる国際宇宙ステーション(ISS)船外曝露部の線量測定(Space radiation dosimetry by PADLES on an exposed area of the ISS Russian segment)”、2006年秋季第67回応用物理学会学術講演会、滋賀(2006.8).
- (8) 熊谷秀則、北城圭一、永松愛子、俵裕子、安田仲宏、“TD-1飛跡生成感度に対する雰囲気中水分量の影響(Effect of atmospheric water on TD-1 sensitivity)”、2006年秋季第67回応用物理学会学術講演会、滋賀(2006.8).
- (9) 北城圭一、熊谷秀則、永松愛子、俵裕子、“宇宙放射線計測システムAutoPADLESの開発(I) –CR-39エッチピット自動検出法の検討(A Development of a space-radiation dosimetry system Auto PADLES (I) –Study of automatic detection method for etch pits of CR-39–)”、2006年秋季第67回応用物理学会学術講演会、滋賀(2006.8).
- (10) 永松愛子、俵裕子、津田修一、Marco Casolino、熊谷秀則、北城圭一、“国際宇宙ステーション(ISS)クルーコンパートメント遮蔽材の線量寄与検討のためのロシアモジュール線量測定実験Space radiation dosimetry by PADLES on the ISS Russian segment to evaluate the effect of crew cabin shielding on the dose contribution”、固体飛跡検出器学会、千葉(2007.3).
- (11) 永松愛子、“ライフサイエンス実験のための受動積算型線量計PADLESによるLEO(Low Earth Orbit)宇宙放射線計測”、第14回宇宙医学研究推進分科会第2回:宇宙放射線環境と放射線影響の実験に向けたモデル生物WS、東京(2007.12).
- (12) 永松愛子、“JAXAの宇宙放射線計測”、第14回宇宙医学研究推進分科会第5回:宇宙放射線環境と放射線影響の実験に向けたモデル生物WS、東京(2007.12).
- (13) 永松愛子、村上敬司、荒木秀二、小山正人、俵裕子、“受動積算型線量計PADLESによるLEO(Low Earth Orbit)宇宙放射線計測”、第22回放射線検出器とその応用、つくば(2008.2)
- (14) 永松愛子、村上敬司、荒木秀二、小山正人、熊谷秀則、北城圭一、俵裕子、“Space radiation dosimetry in the Low Earth Orbit using a passive integrating dosimeter ‘PADLES’ ”、第23回固体飛跡検出器研究会、東京(2008.3).
- (15) 俵裕子、永松愛子、北城圭一、熊谷秀則、“Dosimetry for fast neutrons by the measurement of

LET distributions for secondary heavy charged particles in CR-39 plastic”、第 23 回 固体飛跡検出器研究会、東京(2008.3).

- (16) 熊谷秀則、北城圭一、永松 愛子、俵 裕子、“国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」への搭載に向けたPADLESの開発(Development of PADLES dosimeter to use in Japanese Experiment Module (Kibo) of ISS)”、第 23 回 固体飛跡検出器研究会、東京(2008.3).
- (17) 北城圭一、熊谷秀則、永松 愛子、俵 裕子、“TD-1 プラスチックを用いたLET分布測定法の再検討(Reexamination for the method of LET distribution measurements with TD-1 plastic plates)”、第 23 回 固体飛跡検出器研究会、東京(2008.3).
- (18) Y. Shizu, A. Nagamatsu, Y. Koike, S. Ishida, I. Tayama, K. Murakami, S. Araki, H. Tawara, S. Tachibana, T. Tanaka, K. Yanagawa, ”Utilization and verification flight experiments of Crew ADLES, JAXA Crew Passive Dosimeter”、第 26 回宇宙技術および科学のシンポジウムISTS)、浜松(2008.4).

### 2-3. 外部発表(プロシーディング、報告書)

- (1) Y.Uchibori et.al. , “Intercalibration of Space radiation Monitors with Heavy Ion Beam”(課題番号 16P-113)、2004 年度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報告書 (2005).
- (2) Y.Uchibori et.al. , “Intercalibration of Space radiation Monitors with Heavy Ion Beam”(課題番号 16P-113)、2005 年度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報告書 (2005).
- (3) ISS 科学プロジェクト室/宇宙環境利用センター 平成16年度 年報(2005 年 10 月).
- (4) 村井正、矢部志津、永松愛子、俵裕子、熊谷秀則、宮澤義典、北城圭一、小平聡、安田仲宏、“宇宙放射線個人被ばく線量計測におけるCR-39 感度の酸素分圧影響評価Ambient Oxygen Pressure Effect to CR-39 Sensitivity for Astronauts Radiation Dosimetry”(課題番号 17P-205)、2005 年度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報告書(2006).
- (5) 永松愛子、熊谷秀則、俵裕子、“宇宙放射線計測システムPADLESの開発”、第 20 回 検出器とその応用プロシーディング(2006).
- (6) Y.Uchibori et.al. , “Intercalibration of Space radiation Monitors with Heavy Ion Beam”(課題番号 16P-113)、2006 年度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報告書 (2007).
- (7) 俵 裕子、永松 愛子、熊谷 秀則、“Results from the first two InterComparison of dosimetric instruments for Cosmic radiation with heavy Ions Beams at NIRS (ICCHIBAN-3&4) Experiments”、NIRS HIMAC-128 (2007).
- (8) 永松愛子、村上敬司、荒木秀二、小山正人、俵裕子、“受動積算型線量計PADLESによるLEO放射線計測”、第 22 回 検出器とその応用プロシーディング(2008).