

宇宙船内における重粒子線による線量計測とその生物効果実験 (RADIATION)

重粒子線による線量計測

代表研究者： 道家忠義^{*1}

共同研究者： 菊池 順^{*1}、林 孝義^{*1}、長谷部信行^{*2}、

Gautam D. Badhwar^{*3}、長岡俊治^{*4}、加藤充康^{*4}

^{*1} 早稲田大学 理工学総合研究センター、^{*2} 愛媛大学 教養部、^{*3} NASA Johnson Space Center、

^{*4} 宇宙開発事業団 筑波宇宙センター

The space radiation dosimetry measurements have been made on board the Space Shuttle STS-65 (IML-2; inclination 28.5°, altitude 300 km). In these measurements, three kinds of detectors were used; a newly developed silicon detector telescope (active detector) called "Real time Radiation Monitoring Device (RRMD)" and conventional passive detectors of TLDs and CR-39 track detectors. Using RRMD, the first attempt of real time monitoring of space radiation has been achieved successfully for continuous 251.3 hr. The RRMD results indicate that a clear enhancement of the number of trapped particles is seen at the South Atlantic Anomaly (SAA) without clear enhancement of dose equivalent, while some daily periodic enhancements of dose equivalent due to high LET particles are seen at the smaller geomagnetic cutoff regions for galactic cosmic ray particles (GCRs), which are main contribution to dose equivalent in this low altitude mission (300 km). Also, the rates of dose equivalents obtained by TLDs and CR-39 ranged from 146.9 to 165.2 $\mu\text{Sv/day}$ and the average quality factors from 1.45 to 1.57 depending on the locations and directions inside the Space-Lab at the mission of 28.5° × 300 km. The LET distributions obtained by RRMD and CR-39, are in good agreement in the region of 15 to 200 keV/ μm and difference of these distributions in the region of LET < 15 keV/ μm and LET > 200 keV/ μm can be explained by considering characteristics of CR-39 track formation, especially for the low LET tracks.

実験の目的、意義

これまで宇宙放射線の線量計測は、主にプラスチックなどのパッシブな固体飛跡検出器で行われてきた。しかし、この方法の最大の欠点は、宇宙船の地上帰還後にしか、その線量計測を行うことができない、という点にある。この種の計測方法では、飛行中に突然発生する大型の太陽フレアに対する防護という点において全く無力である。このため、本実験では、将来、乗組員に対して警報及び予報を発することができるように、アクティブな検出器を用いて、世界で初めて実時間で宇宙重粒子線の線量計測を試みることを目的にしている。また、このような測定結果によって校正されたプラスチック検出器(CR-39)と熱ルミネッセンス線量計との組合せで、シャトル内での線量計測がなされた。

実験の方法

計測の概略

IML-2における放射線モニター装置(RRMD: Real Time Radiation Monitoring Device)の実験は、1994年7月8日にNASAケネディ宇宙センター(KSC)から打上げられたスペース・シャトル(飛行番号 STS-65)内で行われ、線量当量の推定に必要な観測データがNASAマーシャル宇宙飛行センター(MSFC)に送付され、直ちに解析されて、粒子の観測器への入射の様態、計数率と線量当量の時間変化やLET (Linear Energy Transfer)-分布が、実時間でQL (Quick Look)によって示された。STS-65は、傾斜角 28.5°、高度約 300km の円軌道を 14.68 日間に渡って飛行し、初期のデータ送付の欠損の件を除けば計 251.3 時間にわたる連続観測に成功した。ここに、この RRMD の結果と共に、同時に搭載された TLD(熱蛍光線量計)と CR-39 (ジエチレングリコールビスアリルカーボネート樹脂) による線量計測がなされた結果について報告したい。

搭載された機器: RRMD, TLD 及び CR-39

1) RRMD について

初めに、RRMD の構造とその動作原理について簡単に説明したい。図 1 に RRMD の検出部の断面を示す。

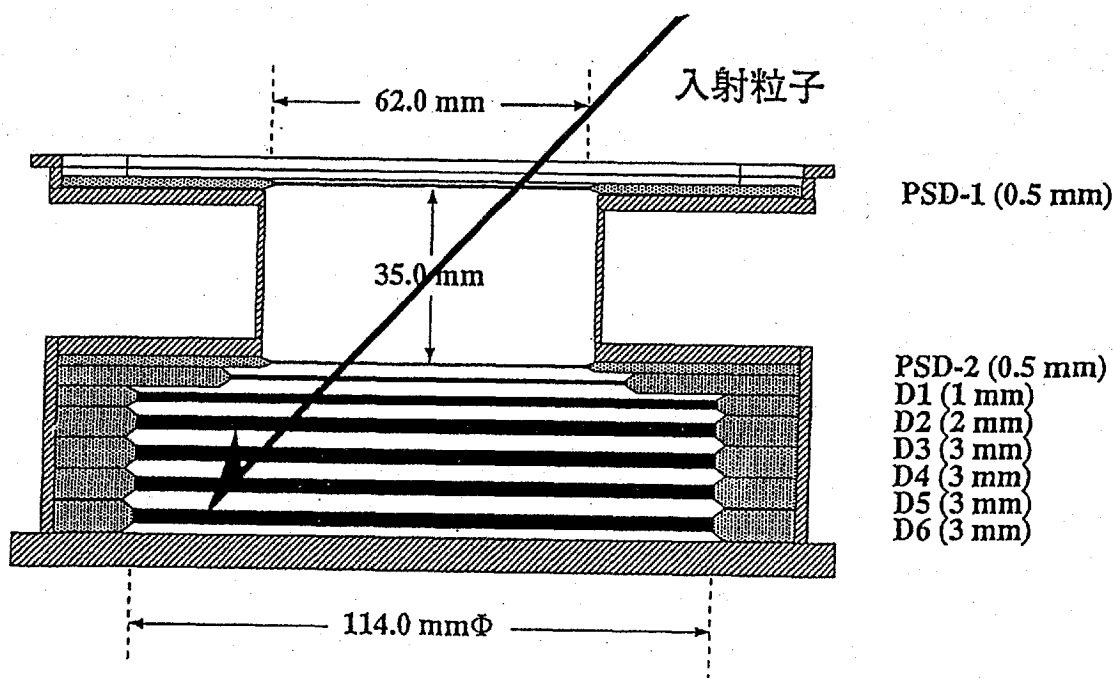


図 1 放射線モニター装置検出器の断面図

図から分かるように、検出部は、上部に置かれた 500 μm の厚さの 2 枚の 2 次元位置検出器と、その下部に置かれた 6 枚の 1 mm から 3 mm の厚さを持つ普通のシリコン検出器とから成る。入射粒子が上部の 2 枚の位置検出器を通過すると、その通過位置から粒子の

入射角が決定される。このような個々の粒子の入射角とそれらによる検出器への付与エネルギーとから各検出器における垂直入射の場合のエネルギー損失の分布が得られる。これは、そのまま、シリコン検出器での LET-分布を与えることになる。しかし、実際上は、上部の2ヶの位置検出器の同時計数信号でトリガーしているため、下から入射して来る粒子で上部の位置検出器に達しないものは除かれる。幸い、位置検出器の厚さは $500\ \mu\text{m}$ と薄いため、以上の方法で得られた LET-分布には、下から入射する粒子の寄与は後に示すように極めて少ないので、2番目の2次元位置検出器の LET-分布で本物の LET-分布を近似できる。このような理由で、今後は、2番目の2次元位置検出器での LET-分布を代表的なものと考えた。

2) 線量計測用パッケージ(TLDs と CR-39)

図2は、検出器テレスコープと共にその電子回路系が収められているディテクター・ユニットの外観図である。

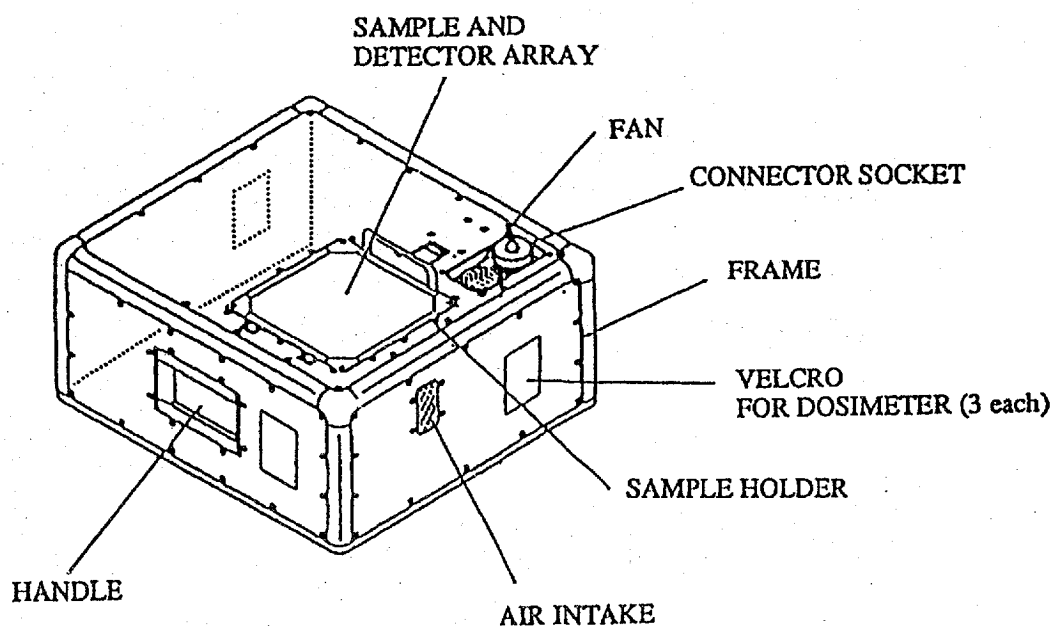


図2 放射線モニター装置ディテクター・ユニットの外観図

検出器テレスコープは生物試料(サンプルホルダー)の直下に上向きに取り付けられている。生物試料の厚さは $1.0\ \text{g}/\text{cm}^2$ 程度で、その生物試料の上下には CR-39 の板がそれぞれ一枚ずつ収められている ($125\ \text{mm} \times 125\ \text{mm} \times 1.2\ \text{mm}$)。また、ディテクター・ユニットの検出器テレスコープが収められている部分の側壁には線量計測用のパッケージが2ヶ (No.2, No.3) 取り付けられている。図3はこれらのパッケージの内部を上部から眺めたもので、TLD (MSO-S:18, LiF-6: 9, LiF-7: 9) が収められており、その上下に厚さ $1\ \text{mm}$ の CR-39 の板が置かれている。さらに同じパッケージがあと2ヶ (No.1, No.4) Biorack インキュベータ内と PEMBSIS 実験のラック収納庫に収められている。これら飛行用のパッケージの外、同じものが4ヶコントロール用として用意され、飛行期間を除いて同一の経路をたどって運ばれた。このディテクター・ユニットは移動可能で、スペースシャトルの飛行中にその向きや位置を変えることができる。図4に、初め予定されていた向き及び位置の変化の順

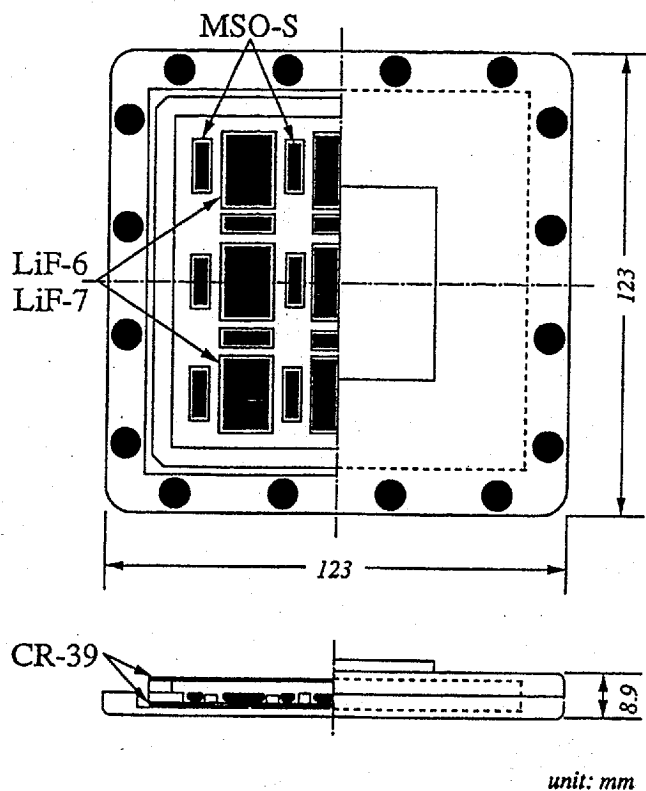


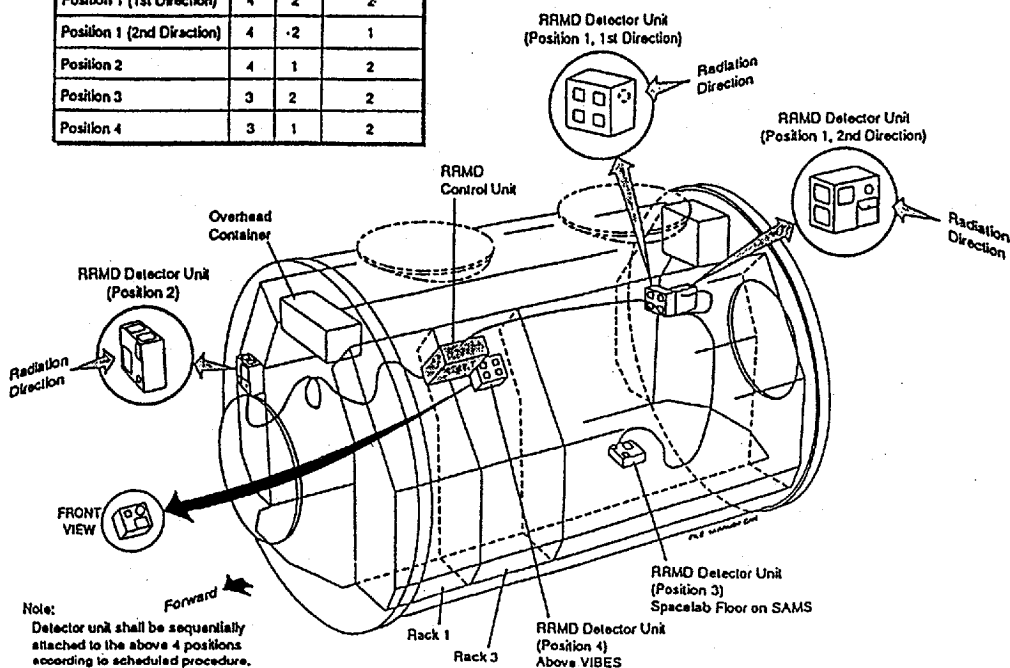
図3 線量計測用パッケージ

を示す。しかし、初めの1日半は、思わぬ結線事故のためにデータが下りてこず、実時間のデータ取得はできなかった。しかし、データ取得ができるようになってからは測定は順調に進み 251.3 時間にわたって連続観測が行えた。このような時間短縮と室内の温度上昇による Position 3 における観測の一時中止の結果、実際の場合の向き、位置の変化及び観測期間は、表 1 のようになった。

地上予備実験

本実験は、測定器の準備以外、特別な地上予備実験は必要とされていないので行ってない。ただし、飛行後、線量計測の開始直前にセンサー部からの出力パルスの波高の直線性と検出器のノイズレベルの測定を行い、飛行前の特性を保っていることを確認した。

Detector Position	Position sw	Direction sw
Position 1 (1st Direction)	4	2
Position 1 (2nd Direction)	4	2
Position 2	4	1
Position 3	3	2
Position 4	3	1



Note: Detector unit shall be sequentially attached to the above 4 positions according to scheduled procedure.

図4 スペースラブ内の線量計測の場所(初期の予定)

飛行実験の結果

表1 スペースラブ内の観測場所及び観測時間

Location	Position & Direction
No. 1	Position 1 & 1st Direction (7/10, 18:00 ~ 7/13, 22:49) 3840 min
No. 2	Position 1 & 2nd Direction (7/13, 22:49 ~ 7/16, 9:19) 2872 min
No. 3	Position 2 (7/16, 9:19 ~ 7/18, 14:03) 2552 min
No. 4	Position 1 & 2nd Direction (7/18, 14:03 ~ 7/19, 10:42) 992 min
No. 5	Position 3 (7/19, 10:42 ~ 7/21, 5:33) 2160 min

RRMDの連続観測結果

スペース・シャトル内での LET-分布と線量量の実時間での観測は、MSFCで行われ、あらかじめ用意されていた QL (Quick Look)用のソフトを用いてなされた。その QLは、次のような4パターンから成っている。

- 1) 個々の入射粒子の検出器テレスコープへの入射位置と方向を示す図とともに、その通過の際、個々の検出器に付与されたエネルギーを生体組織の LET に変換したものを示し、その粒子が完全に突き抜ける場合(すなわち相対論的速度領域にある場合)にはそれがどの元素に相当するかが分かるような表示を行った。図5はその典型的な1例である。

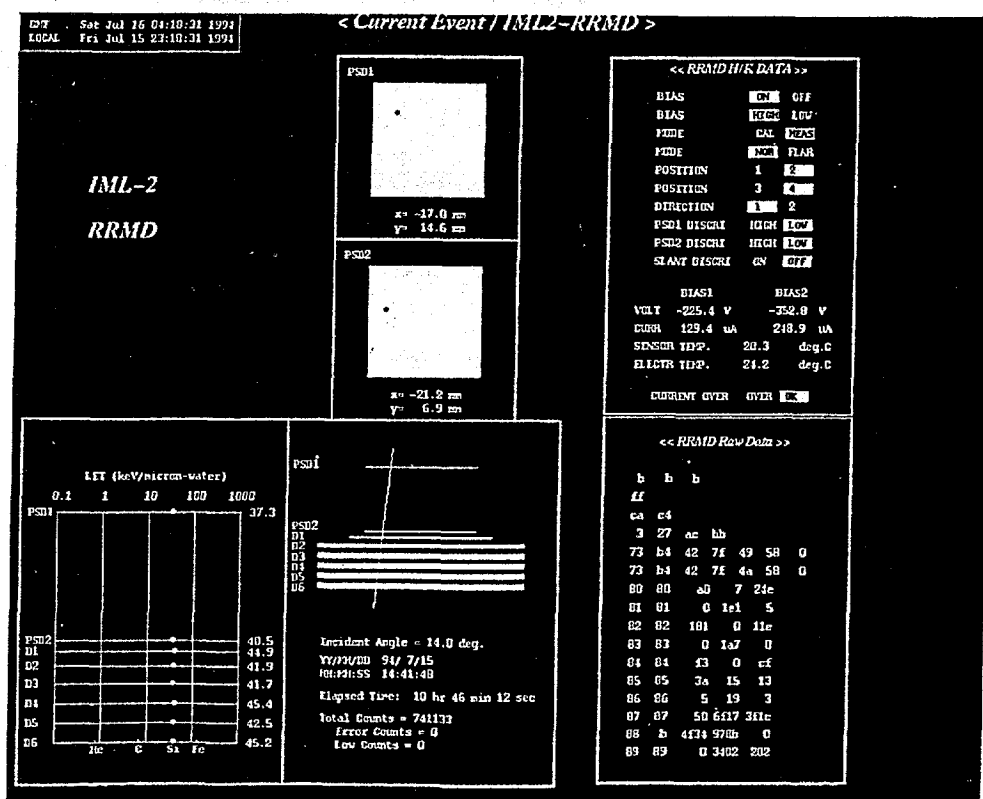


図5 実時間モニター用 Quick Lock (QL)スクリーンの一つの例(テキスト参照)

また、RRMDの現在位置や検出器内の温度及び検出器に対する印加電圧、漏洩電流等も合わせて表示した。

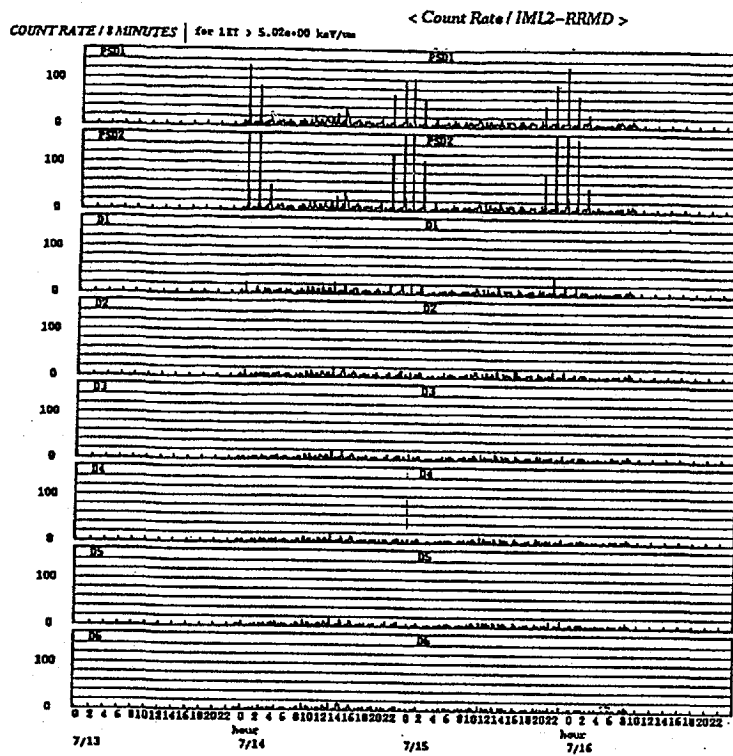


図6 Position 1, 2nd Directionの8ヶの検出器での粒子計数率の時間変化(実時間計測)

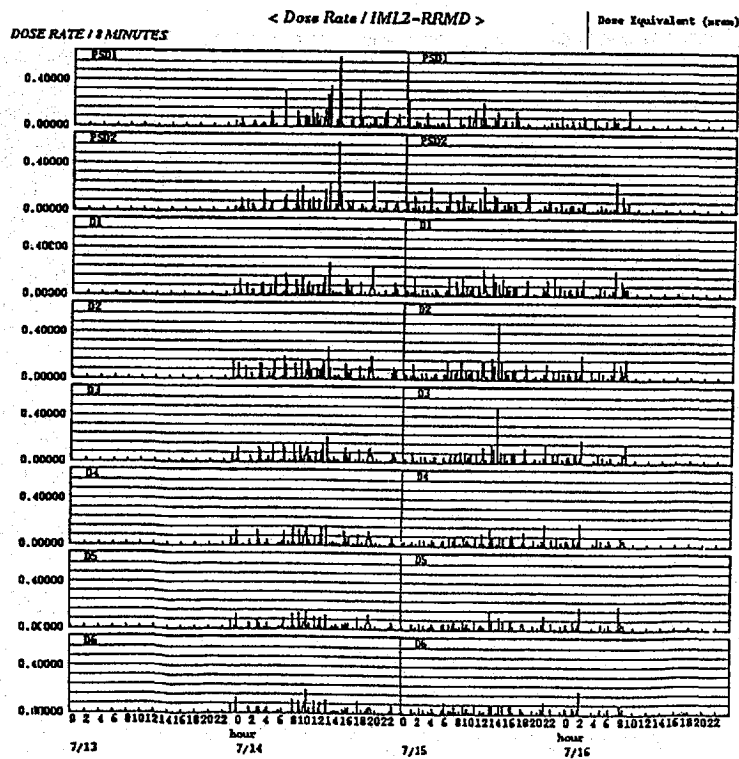


図7 図6と同様の条件における、線量当量率の時間変化(実時間計測)

2) 上部に置かれた2ヶの2次元位置検出器からの同時計数信号でトリガーされた各検出

器の計数率の時間変化が示された。その1例として、Position 1, 2nd Directionの場合を図6に示す。この表示での特長あるパターンは、2次元位置検出器で、シャトルがBrazil Anomalyの近辺を通過する際の計数率の増加で、期待されるごとくそれらはシャトルの回周周期(90分)で現れ、これらのピーク群も1日の周期で現れては消える。このような変化は、位置検出器以外のものでは観測されなかった。このことは、Brazil Anomaly通過の影響は、低エネルギー粒子に限られることを意味している。

- 3) 次に、線量当量率の時間変化が示された。図7はPosition 1, 2nd Directionでのその観測結果である。これから分かるように、位置検出器で現れた計数率のピーク群は、ここでは全く観測されなかった。このことは、Brazil Anomalyでの地磁気捕捉粒子の線量当量への影響は極めて少ないことを意味している。むしろ、ほぼ、1日周期で線量当量率の増減が観測された。これは、シャトルの地球回周の際の、銀河粒子線に対する地磁気のcut-off rigidityの変化によるものである。前述のように測定された値は、後方から入射して、トップに置かれた2次元位置検出器を通過せず途中の検出器で停止した粒子の寄与は含まないため、その分に対する補正を必要とする。図8に全観測位置で測定されたシリコン検出器の厚さに対する検出器それぞれの線量当量の変化を示す。明らかに、線量当量が、検出器の厚さと共に減少して行くが、これは後方からの入射粒子の寄与が取り入れられていないことによる。しかし、上部の検出器では、ほとんど、変化はなくこの付近の値が、得られた線量当量として最も妥当なものを見出すことができよう。最上の位置検出器はそこに入射して停止した粒子の寄与を含まないので、ここでは、2番目の

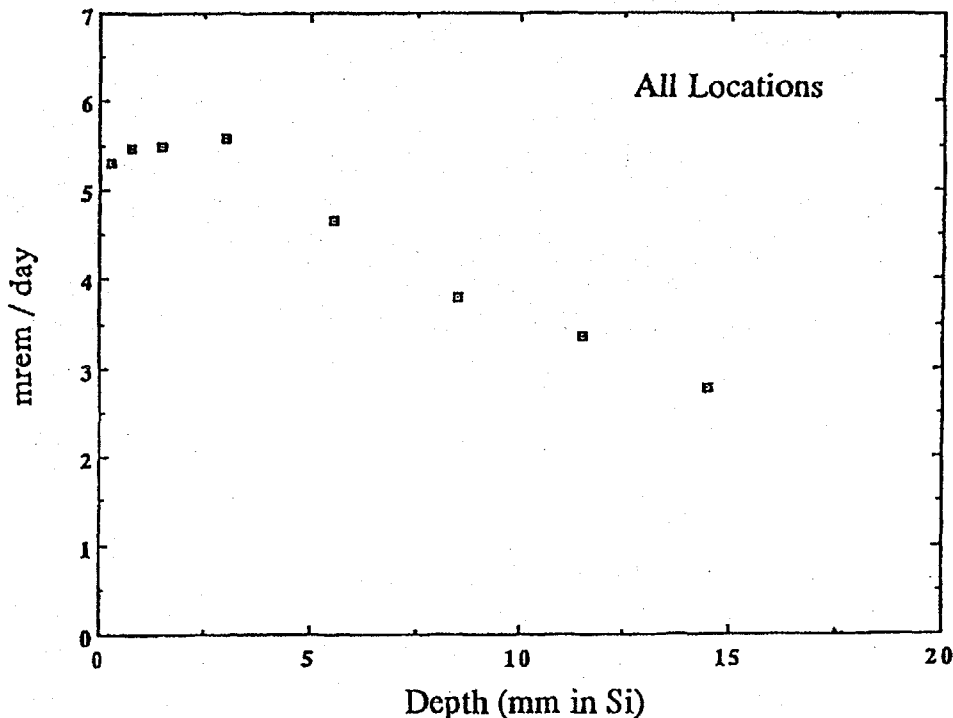


図8 シリコン検出器の厚さに対する線量当量率の変化

位置検出器の線量当量の値を、他と比較すべき標準値として取り扱う事にする。表2は、それぞれのPositionで得られた2番目の位置検出器での吸収線量率、線量当量率及びそれら両者の比である実効線質係数(EQF: Effective Quality Factor)である。

表2 各々の観測場所での吸収線量率、線量当量率及び実効線質係数

Location	Absorbed dose ($\mu\text{Gy/day}$)	Dose equivalent ($\mu\text{Sv/day}$)	Quality factor (average)
No. 1	6.8	61.0 (62.3)	8.97 (9.16)
No. 2	7.5	54.0 (55.1)	7.20 (7.35)
No. 3	7.1	60.8 (61.6)	8.56 (8.68)
No. 4	6.5	41.7 (41.8)	6.42 (6.43)
No. 5	5.1	38.4 (38.6)	7.53 (7.57)
All Locations	6.7	53.9 (54.8)	8.04 (8.18)

これらの値はすべての粒子で突き抜けたものと仮定して得られているが、中には、2番目の位置検出器で停止してしまったものもある。それらに対しては補正をする必要がある。()内は補正の結果を示している。その影響は、これらの観測では、ほぼ2%程度と推定される。各観測点における $\text{LET} > 5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ に対する1日当たりの平均の線量当量は $38.6 \sim 62.3 \mu\text{Sv/day}$ であった。

- 4) 最後の表示は、図9に示すようなLETの積分及び微分スペクトルである。両スペクトルの下限はいずれも $5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ で、これは電氣的雑音のレベルによって決る。この下限は、 $3.5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 程度まで下げられるが、時々電氣的雑音レベルの増加があるためこの閾値を使用した。宇宙船の内部に置かれた場合を除き、図から見られるように、微分スペクトラムでは、相対論的速度領域にあるOやFe粒子の通過に起因する急峻な立ち上がり部分やピークがみられる。また、積分スペクトルでもそれに対応する処に明確な折れ曲がりが見られる。これらは始めから宇宙粒子線の寄与として期待されていたものである。

TLDの測定結果

TLDとしては、今回も、MSO-SとLiF-6とLiF-7とが使用された。ただし、LiFの場合は、その感度を増すために量を増やし、円形板状のもの(10 mm ϕ 、 $t = 0.5 \text{ mm}$)を使用した。その結果、確かに感度の上昇は確認され、地表に置かれたコントロールとシャトルに搭載されたものとは有意な差が見られたが、それぞれのばらつきが大きく、その差は、同じCo-60のガンマ線源で校正したMSO-Sの場合の半分以下であった。このような違いは、それぞれの低エネルギー領域での感度の差を考慮しても説明は困難である。むしろ、LiFは加圧や取扱い上生れる歪み等に敏感なので、MSO-Sのようにガラスのカプセルに封じる必要があるのかもしれない。このような理由で、ここでは、LiF線量計の結果は除き、MSO-Sの結果のみを表3, 4に示す。表3はコントロールとして、飛翔用のものを同経路で打ち上げ場に運ばれ、飛翔時はそのまま地表に置かれたもの(4パッケージ)で、その線

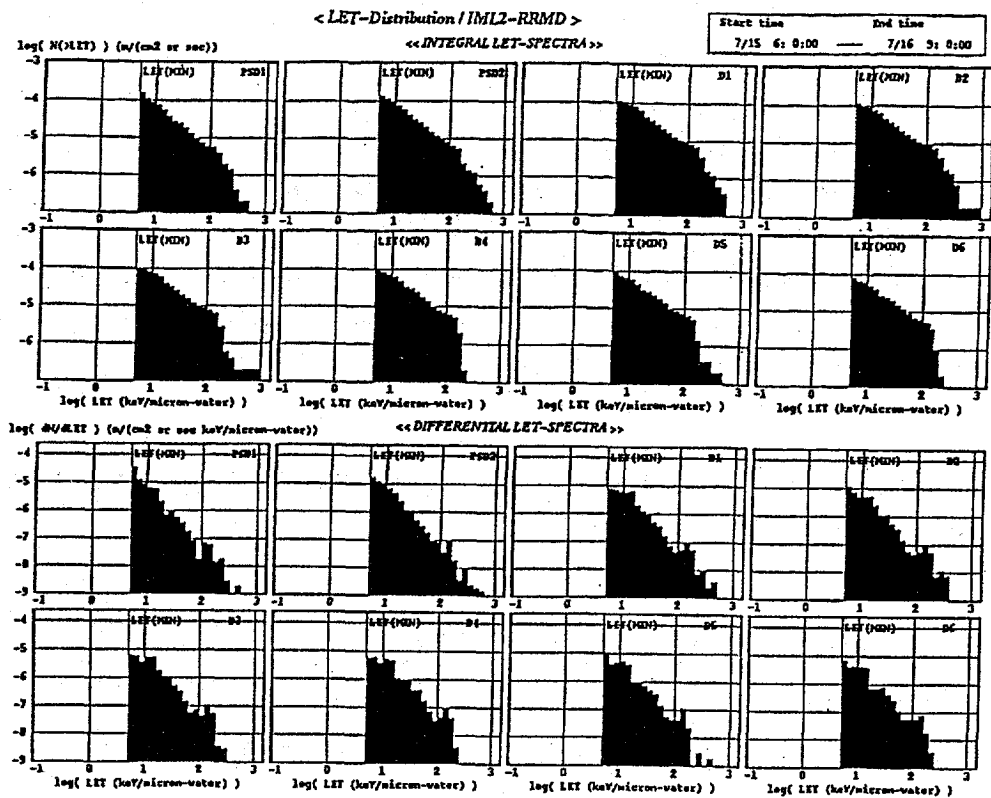


図 9 Position 1, 2nd Direction の積分、微分 LET-スペクトル

表 3 コントロール用パッケージにおける吸収線量

Package No.	6	7	8	9	Average of all
Average absorbed dose (μGy)	187.6	195.9	197.8	192.6	193.5
Standard deviation (μGy)	+16.0	+ 6.5	+19.0	+11.7	+14.6

量は平均 $193.5 \pm 14.6 \mu\text{Gy}$ であった。この値は飛翔したそれぞれからバックグラウンドとして、差し引かれた。飛翔時に地表で被爆したバックグラウンドは飛翔中のものから差し引かれるべきものではないが、その誤差は多くとも $40 \mu\text{Gy}$ 以下であり、多くとも 3% の寄与にすぎないので無視することにした。表 4 で、パッケージ No.1 と No.4 は Biorack インキュベータ内と PEMBSIS 実験のラック収納庫内の植物細胞培養容器近傍に取り付けられ、No.2 と No.3 は RRMD のディテクター・ユニットの側壁に取り付けられた。それぞれのパッケージにおける飛翔中の平均の吸収線量率は $91.4 \sim 110.6 \mu\text{Gy/day}$ でいずれも 10% の範囲に入っており場所による差は少ない。また、これらは FMPT (First Material Processing Test) の場合のほぼ 2/3 である¹⁾。

表 4 TLD (MSO-S) 及び CR-39 で得られたパッケージ毎の吸収線量率と両者の組合せによって得られた線量当量率

Package No.	1	2	3	4
TLDs(MSO):				
Absorbed dose (μGy)	1534.8	1720.2	1816.6	1702.3
Standard deviation (μGy)	+35.6	+34.0	+73.7	+86.0
Average dose (μGy) in flight	1341.3 +39.7	1526.7 +37.0	1623.1 +75.1	1508.8 +87.2
Average dose rate ($\mu\text{Gy/day}$) in flight*	91.4 +2.7	104.0 +2.5	110.6 +5.1	102.8 +5.9
CR-39:				
Average dose rate ($\mu\text{Gy/day}$)**	5.9	6.1	8.2	7.7
Average dose equivalent rate ($\mu\text{Sv/day}$)***	59.1	57.6	59.6	60.4
Total:				
Average dose rate ($\mu\text{Gy/day}$)	93.7	106.4	113.8	105.8
Average dose equivalent rate ($\mu\text{Sv/day}$)	146.9	157.8	165.2	158.5
Average quality factor	1.57	1.48	1.45	1.50

* Assumed that the real flight time was 14.68 days.

** These values have been multiplied by a ratio 1.18 of data by RRMD and CR-39 (see text).

*** These values have been multiplied by a ratio 1.27 of data by RRMD and CR-39 (see text).

CR-39 プラスチック板による
LET-分布の測定

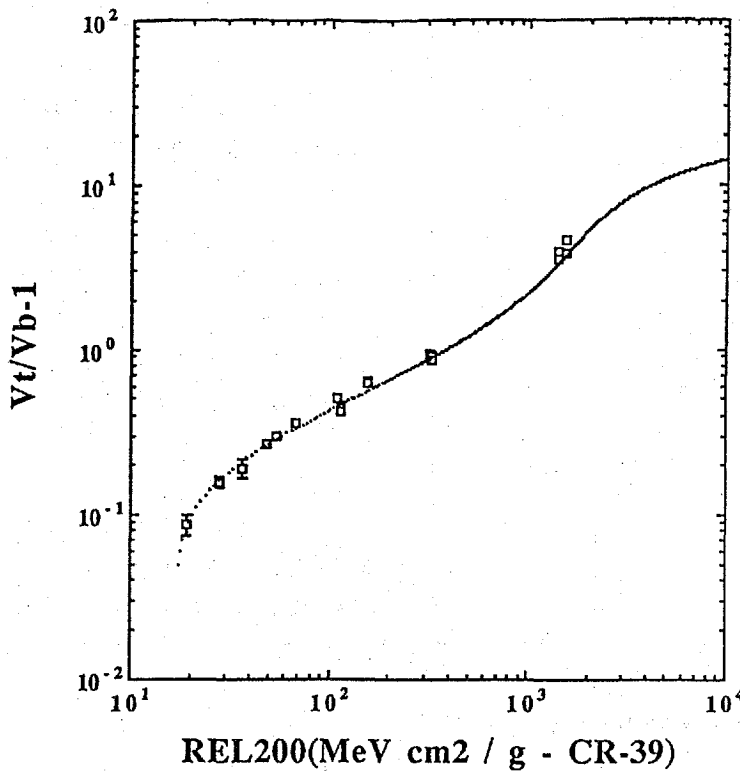


図 10 CR-39 の感度校正曲線

今回も、FMPTの時と同じCR-39プラスチック板(99.5 mm × 99.5 mm × 1 mm)が使用された。そのエッチングは、70 °Cの7N NaOH溶液で30時間行なわれた。その条件下の校正曲線を図10に示し、これを使用して得られたそれぞれのLET-分布を図11にまとめた。これからLET-分布は場所により大きな変化はないことが分かる。

解析と考察

CR-39から得られるLET-分布と Rossi Counter 法から得られたものに間にかんりの差が存在することは以前から知られている¹⁾。そこでRRMDで得られた結果とCR-39との結果の比較を行なった。図12は、RRMDの直上のCR-39から得られたLET-分布とRRMDの結果との比較である。15 keV/μm から200 keV/μm のLETの範囲では両者の結果が良く一致している。15 keV/μm 以下では、Appendixに示すように、表面での飛跡生成感度の劣化のため²⁾、正確なフルエンスを得るためには深い入射角で入射した粒子に対する補正が必要となる。200 keV/μm 以上の高LET粒子に対しては飛程が短いため数え落としがある可能性があるがその全体に対する寄与は少ないのでここではそれを無視することとする。

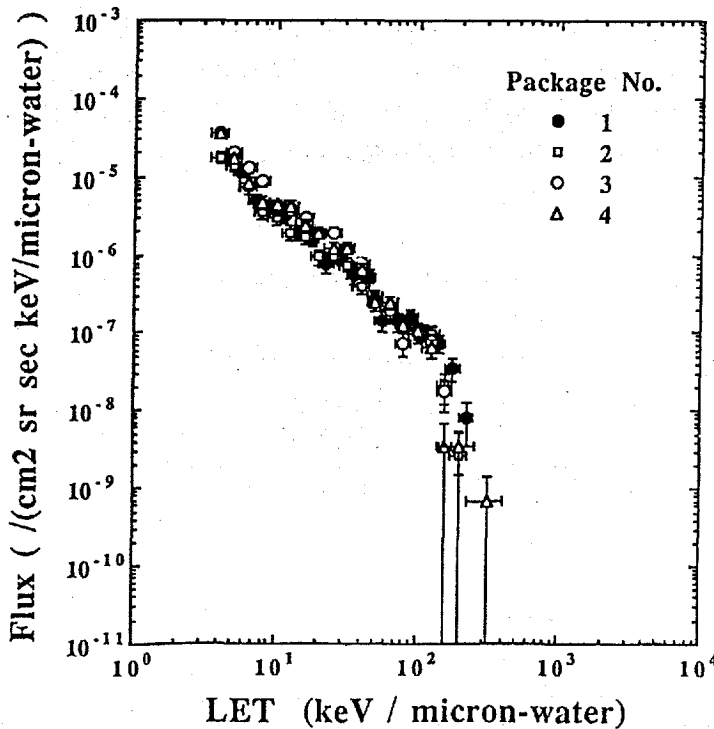


図 11 CR-39 によって得られた LET-分布曲線

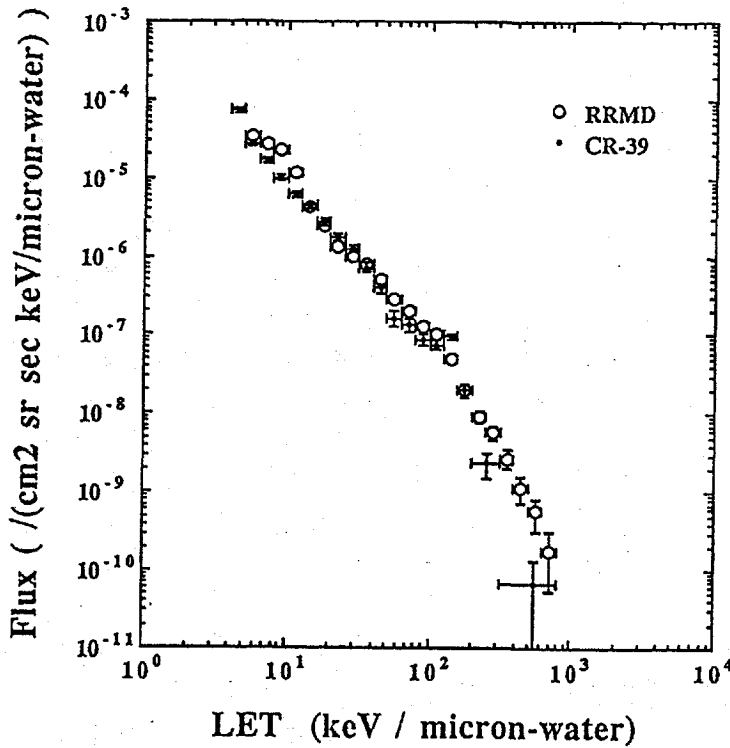


図 12 RRMDとCR-39によって得られた LET-分布曲線の比較

HRM (High Rate Multiplexer)の故障によるデータの損失以外は、ほぼ当初に予定されていた通りに実行され、成功した。RRMDとCR-39によるLET-スペクトラムは図12に見られるように、低、高LET粒子の一部を除いて良い一致を示した。結果としてシャトル内で146.9 ~ 165.2 $\mu\text{Sv/day}$ の線量当量率、1.45 ~ 1.57の実効線質係数が得られた。

表 5 RRMDとCR-39によって得られた吸収線量と線量当量の比較

	LET Range [keV/ μm]	Absorbed Dose Rate [$\mu\text{Gy/day}$]	Dose Equi. Rate [$\mu\text{Sv/day}$]
RRMD	> 5.0	6.7	54.8
RRMD	> 3.5*	8.0	56.7
CR-39	> 3.5	6.8	44.7
Ratio of RRMD/CR-39		1.18	1.27

* Data have been corrected from the values for LET > 5.0 keV/ μm using the extrapolation of LET distribution down to 3.5 keV/ μm .

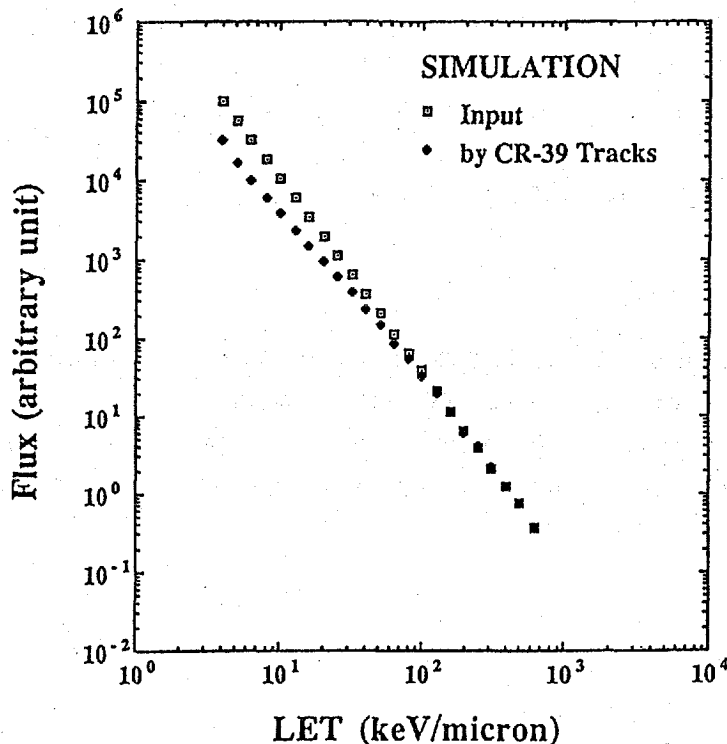
低LET-領域での補正は、幸い、CR-39から得られたLET-分布にほとんど差がないことからRRMDの結果を正しいとして両者の吸収線量や線量当量の比(表5参照)を、それぞれのCR-39から得られた値に乗ずることによってなされた。その結果を、FMPTの時に使用した方法¹⁾を用いTLDsの結果と組み合わせて、線量当量と実効線質係数を求めたものを表4の下部(Total)に示す。結果として、シャトル飛翔間の被曝線量当量率は146.9 ~ 165.2 $\mu\text{Sv/day}$ 、実効線質係数は1.45 ~ 1.57となった。

結論

本文に述べたように、リアルタイム線量計測の全体のオペレーションは、初期の

付録

LETが $15 \text{ keV}/\mu\text{m}$ 以下の領域では、エッチングされた CR-39 プラスチック板表面のエッチ・ピットの形状(楕円)が入射角の増加と共に崩れてくることは昔から知られている²⁾。このようなエッチ・ピットの楕円形状の変形のため LET はより小さく推定される。この傾向は、現在使用されている CR-39 でなく、古いアンタイ・オキシダントの入っていない CR-39 を使用した宇宙線の観測結果(それはあらゆる入射方向の粒子を含む)を用いて再現することができる。図 A-1 は、その一例で、入力した LET-分布(□)に対し、以上の感度



の劣化を考慮すると◆程度のフルエンスの減少を来すことになる。現在の CR-39 の感度はこの古い物よりも良いので、この差 ($3.5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ でほぼ 2~3 倍) はむしろ大き過ぎであると考えられる。実際には図 12 程度の差となり、従って、CR-39 で得られる線量当量の値は、全体として RRMD を基準に取った場合の 2~3 割減が妥当な処であると考えた。真の補正を行うためには、現在の CR-39 で、色々な角度で入射した場合のエッチ・ピットの形状を調べ正確な補正係数を求める必要がある。

図 A-1 古い CR-39 を使用した時の入射角度依存性補正

参考文献

- 1) Doke, T., Hayashi, T., Nagaoka, S., Ogura, K. and Takeuchi, R. Estimation of Dose Equivalent in STS-47 by a Combination of TLDs and CR-39. *Radiation Measurements*. 24, 75-82 (1995).
- 2) Hayashi, T. and Doke, T. Characteristics of Plastic CR-39 for Detection of Relativistic Cosmic Ray Heavy Nuclei. *Nucl. Instr. & Meth.* 174, 349-355 (1980).

外部発表

講演、学会発表

- 1) 道家忠義、林 孝義、菊池 順、長谷部信行、Badhwar, Gautam. IML-2実験におけるRRMDの測定結果. 第11回宇宙利用シンポジウムプロシーディング(1994). 1-4.
- 2) 道家忠義、林 孝義、加藤充康、長岡俊治、小倉紘一、竹内竜一. IML-2におけるCR-39による宇宙放射線のLET-分布の測定. 第42回応用物理学関係連合講演会, 東海大学(1995).
- 3) 道家忠義、林 孝義、菊池 順、長谷部信行、長岡俊治、加藤充康、Badhwar, Gautam. IML-2(スペースラブ STS-65)による宇宙放射線のLET-分布のリアルタイム測定. 第42回応用物理学関係連合講演会, 東海大学(1995).
- 4) Doke, T., Kikuchi, J., Hayashi, T., Takeuchi, R., Hasebe, N., Ogura, K., Nagaoka, S., Kato, M. and Badhwar, Gautam D. Measurement of LET Distribution and Dose Equivalent on Board the Space Shuttle STS-65 (IML-2). *Proceedings of the Twelfth Space Utilization Symposium* (1995). 114-118.

論文

- 1) Doke, T., Hayashi, T., Kikuchi, J., Hasebe, N., Nagaoka, S., Kato, M. and Badhwar, G. D. Real Time Measurement of LET Distributions in the IML-2 Space Lab (STS-65). *Nucl. Instr. & Meth.* In press.
- 2) Hayashi, T., Doke, T., Kikuchi, J., Takeuchi, R., Hasebe, N., Ogura, K., Nagaoka, S., Kato, M. and Badhwar, G. D. Measurement of LET Distribution and Dose Equivalent on board the Space Shuttle STS-65 (IML-2). submitted to *Nucl. Instr. & Meth.*