

## 宇宙放射線防護体系検討委員会報告について

平成11年3月3日

放射線医学総合研究所

保田 浩志

### 1. 経 緯

宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会（委員長：飯田孝夫 名古屋大学大学院 教授）は、宇宙飛行士や航空機乗務員等の飛翔体搭乗者を宇宙放射線による被ばくから適切に防護するための体系を構築することを目的として、放射線医学総合研究所内に組織された。特に、21世紀に予定されている有人宇宙活動において宇宙滞在期間が長期化する傾向にあることから、その放射線防護にかかわる問題点を明確にし、その解決に必要となる研究を効率的に推進することを狙いとして審議を重ねてきた。本委員会で審議の対象としたのは主として以下の項目である。

1. 宇宙放射線防護に関する安全解析研究課題
2. 宇宙放射線リスクの評価手法に関する物理・生物学研究課題
3. 宇宙放射線被ばくの低減対策に関する工学・医学研究課題

### 2. 報告書の主要内容（報告書参照）

#### 2-1. 緒 言

宇宙は地球上の生物にとって未知の領域であったが、今、ヒトという種が活動の場を広げようと英知を結集して挑んでいる。未知の世界には、その不確かさ故に、数多くの危険が存在する。宇宙放射線被ばくは、不確かさの大きな危険のひとつである。

#### 2-2 宇宙放射線防護の概念的枠組み

宇宙放射線は自然放射線の一つである。飛翔体搭乗者の被ばくは、行為によって線量が増加するタイプの自然放射線被ばくとして分類できる。宇宙空間での「遮蔽」「距離」「時間」の制御は困難であるが、地上と同様に被ばくを「合

理的に達成できる限り低く」保つように努めるべきである。有人宇宙開発の便益－損害を定量的に議論するのは現時点では難しい。対象となる健康影響は確率的影響、特に発がんであるが、宇宙で経験する特殊なストレス要因との相乗効果により予期しない身体的影響が生じる可能性に留意しておく必要がある。

### 2-3 宇宙放射線の線量評価手法

当面は、集団線量ではなく、宇宙飛行士各人の個人線量が評価の対象となる。これまで得られている放射線被ばく影響の評価に有用なデータは、主として X・ $\gamma$  線のものであり、宇宙で浴びる高エネルギーの粒子線については直接的に利用できる情報はほとんど存在しない。宇宙で浴びる粒子線は、X・ $\gamma$  線と異なり、飛跡に沿った電離密度が大きく、物質中で相互作用しながら 2 次粒子を大量に発生させ、飛程終端に集中的にエネルギーを与える。このような特殊な被ばく源に対して、既存の線量評価手法が妥当かどうかまだ明らかでない。確率的影響の評価尺度として実効線量あるいは実効線量当量のどちらが適当であるかについては、宇宙放射線被ばくの影響の大きな不確かさから、現時点での判断は難しい。当面はどちらかを暫定的に用いることとし、基礎データの取得に努めながら整備を進めるべきである。

### 2-4 宇宙放射線防護の物理・生物学的側面

宇宙放射線被ばくの低減は、長期宇宙滞在において、最も重要な検討事項のひとつである。しかし、宇宙放射線、特に He～Fe といった重イオンの人体への影響に関する定量的知見は極めて不足している。防護にかかる放射線の計測にあたっては、「線質として何を測るべきか」についての議論がまず必要である。これまでは線エネルギー付与 (LET) が対象とされてきたが、最近の知見では粒子種の影響も指摘されている。通常、異なる計測量には異なる測定法が適していることに留意する必要がある。空間のある 1 点における吸収線量は精度よく測れるようになっているが、宇宙飛行士が活動する範囲での線量の空間分布の不均一性については、まだ十分把握できていない。また、放射線防護上重要なのは空間の吸収線量ではなく、人体の各組織・臓器が受ける線量を線質と各部位の重要度で重みづけして足し合わせた合計量（実効線量あるいは実効線量当量）である。したがって、空間あるいは体表での測定値から人体内の線量分布を正確に記述・予測できる技術が早急に必要とされている。

その実現には、高エネルギー重イオンの体内破碎反応に関する基礎データの取得と、その数学モデル化に重点的に取り組む必要がある。組織荷重係数、発がんリスクへの換算係数については、同じ線量でも線量率によって大きく変化し得ること、また微小重力といった宇宙特有の条件下では値が変化する可能性を認識しておくことが必要である。優先的に取り組むべき課題は、「宇宙環境特有のストレス条件下における粒子線（特に重イオン）の長期低線量率被ばくがもたらす確率的影響の解明」と定義できる。研究の実施にあたっては、有人宇宙開発の先進国である米国やロシアとの協力関係を軸として、研究資源や実験機会を相互に有効利用しながら効率的に推進するべきである。特に、放医研の医用重粒子線加速器（HIMAC）については、宇宙放射線研究分野での利用希望が多く、今後世界の宇宙放射線医学研究の拠点となる施設としての積極的な対応が望まれる。

## 2-5 宇宙飛行士の健康管理體系

有人宇宙開発の発展には、宇宙飛行士の健康維持における運用管理側の誠実な取り組みが重要である。インフォームドコンセントに努め、飛行士自身の適切な判断を補助すべきである。宇宙飛行士各人の被ばく歴と健康調査の結果は、今後の宇宙放射線防護を考える上で極めて重要な知見を提供する。飛行士の理解と協力に基づいて、それらの情報の系統的・継続的な蓄積をはかるべきである。

## 2-6 有人宇宙活動における防護基準

多額の資金を要する有人宇宙開発は国際的に推進することが前提である。数年後に迫った国際宇宙ステーションの完成までに、参加各国の理解と承認を得て、国際的な宇宙放射線防護の体系と基準値が確立されることが望まれる。円滑な防護体系の構築には、国内外の放射線分野の研究者が盛んに交流し共同研究を行いながら、活発な議論を容易に行える体制作りが不可欠である。基準値は、今後の基礎的な知見の集積に伴って変更され得ることを認識し、状況の変化にも柔軟に対応できるよう、当面は運用上の基準として暫定的に与えることが望ましい。

## 2-7 結 語

宇宙放射線被ばくにかかる安全性の向上には、費用－効果比の議論が欠かせない。今後の有人宇宙開発の進展には国民の支援が不可欠であり、宇宙放射線防護対策等に対して積極的・継続的な情報公開と正確な情報伝達をはかり、有人宇宙活動の魅力と運用管理側への信頼の維持向上に努めるべきである。同時に、実用的な防護体系を構築するため、宇宙放射線医学分野において基礎研究から運用管理に及ぶ体制の強化および国際化をはかる必要がある。具体的な課題として、以下の5点の事項に重点的に取り組むべきである：

- ・ 宇宙放射線防護の概念的枠組み構築
- ・ 健康リスク評価手法の確立
- ・ 科学的基礎データの充実
- ・ 健康管理体制の整備
- ・ 防護基準のあり方

### 3. 今後の予定

宇宙医学研究では、有人宇宙開発を既に30年以上実施してきた米国・ロシアの経験から謙虚に学ぶ姿勢が必要と思われる。今後は、本委員会で最新の知見を集約しながら、国際的な研究評価ボードにおいて優先研究課題の明確化をはかり、宇宙放射線医学研究分野における国際共同研究や国際ワークショップ等の効率的推進につなげていく。また、宇宙放射線医学研究の進展に必要な、重イオン加速器の国際共同利用を軸とした研究体制のあり方についても本委員会で議論していく。

- |               |                 |
|---------------|-----------------|
| ・ 1999年4月～5月頃 | 第3期委員会の組織       |
| ・ 1999年6月頃    | 国際研究評価ボードの設立・連携 |
| ・ 2000年2月頃    | 中間報告とりまとめ       |
| ・ 2000年3月頃    | 報告書（英文邦訳付）の発刊   |

**宇宙放射線被ばく防護体系  
検討委員会 報告書**

**1998年12月**

**放射線医学総合研究所  
宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会**

**Committee on Radiological Protection in Space**

**宇宙放射線被ばく防護体系  
検討委員会 報告書**

**1998年12月**

**放射線医学総合研究所  
宇宙放射線被ばく防護体系検討委員会**

**Committee on Radiological Protection in Space**

## 目 次

委員会の概要 .....	1
--------------	---

### 報告書・主部

序 .....	3
1. 緒 言 .....	4
2. 宇宙放射線防護の概念的枠組み .....	5
3. 宇宙放射線の線量評価手法 .....	5
4. 宇宙放射線防護の物理・生物学的側面 .....	6
5. 宇宙飛行士の健康管理體系 .....	8
6. 有人宇宙活動における防護基準 .....	8
7. 結 語 .....	9

### 報告書・付録部

A1. 宇宙放射線防護基準の歴史 .....	11
A2. 宇宙放射線環境 .....	19
A3. 宇宙放射線と生物学 .....	33

## 委員会の概要

近年の高高度飛行技術の急速な進展に伴い、飛翔体搭乗者(宇宙飛行士、航空機乗務員、等)が地上とは異なる線質の宇宙放射線によって被ばくする機会が増加してきた。本委員会は、それら飛翔体搭乗者を宇宙放射線による被ばくから適切に防護するための体系を構築することを大きな目的として、1996年度に放射線医学総合研究所内に設置された。特に、1998年度から建設が開始される国際宇宙ステーションに長期滞在する宇宙飛行士の放射線防護は急務の課題であることから、それにかかわる問題点を明確にし、その解決に必要な研究を効率的に推進することを狙いとして審議を重ねてきた。

本委員会で審議の対象としたのは主に以下の事項である：

### (1)宇宙放射線被ばく防護に関する基本的考え方(安全解析研究課題の明確化)

[例]・宇宙空間での長期滞在では、被ばく線量が地上における職業被ばく線量限度を超える恐れが指摘されているが、その健康影響は許容できるか。

・有人宇宙ミッションに伴う被ばくは、合理的にどの程度低減できるのか。

・来世紀初頭に国際宇宙ステーションが完成すれば複数国の宇宙飛行士が同一空間で居住するが、適用される基準はどう定めるべきか。

・被ばく管理は、既存の防護体系(ICRP勧告等)の範囲で考えることができるか。

### (2)宇宙放射線リスクの評価手法(物理・生物学研究課題の明確化)

[例]・放射線の健康リスクは、ほとんどがX線や $\gamma$ 線を対象とした疫学的データ(特に原爆関連の情報)に基づいて評価されているが、幅広いエネルギー分布を持つ粒子(陽子・重粒子・中性子)線から成る宇宙放射線に対して、その知見はどこまで適用できるか。

・宇宙飛行士の個人被ばく線量を測定評価する方法についても、地上でこれまで利用されてきた体系でよいのか。

・ヒトに対するデータがほとんど無い現状で、これらの粒子線がもたらす影響を適切に評価するには、どのような生物実験や物理測定を行えばよいのか。

・生物学的な線量評価方法は、精度や再現性の点で実用に耐えるのか。

### (3)宇宙放射線被ばくの低減対策(工学・医学研究課題の明確化)

[例]・宇宙放射線被ばくを遮蔽によって適切に低減することは可能か。

・船外活動における被ばく管理と線量の低減をどうはかるか。

・宇宙飛行士の健康管理や疫学データの蓄積はどのような体制で行うべきか。



メンバー構成

本委員会に、委員(部会員を含む)あるいはオブザーバーとしてご参加いただき、本報告書の作成にご協力いただいた方々の氏名および所属を

表1に示す。本委員会の下には「宇宙放射線被ばく評価部会」を組織し、宇宙放射線の線量評価にかかる問題に関して審議を行った。

表1 報告書作成・検討メンバー

氏 名	所 属	備 考
飛鳥田一朗	日本航空 健康管理室	
阿部 貴宏	宇宙開発事業団 宇宙医学研究開発室	
飯田 孝夫	名古屋大学大学院 工学研究科	第2期委員長 1998.4.～
岩崎 民子	放射線影響協会 放射線疫学調査センター	第1期委員長 ～1998.3.
甲斐 倫明	大分県立看護科学大学 人間科学講座	1997.1.～
込山 立人	宇宙開発事業団 宇宙医学研究開発室	オブザーバ
熊澤 蕃	日本原子力研究所 国際原子力総合技術センタ	
小佐古敏荘	東京大学 原子力総合研究センター	
小村 和久	金沢大学 理学部	
末満 達憲	宇宙開発事業団 宇宙医学研究開発室	オブザーバ
立崎 英夫	国際原子力機関(IAEA)	～1997.3.
長岡 俊治	宇宙開発事業団 宇宙環境利用システム本部	
野口 邦和	日本大学 歯学部	
湊 進	名古屋工業技術研究所 融合材料部	～1998.3.
安藤 興一	放射線医学総合研究所 第3研究グループ	1997.4.～
内山 正史	放射線医学総合研究所 人間環境研究部	～1998.3.
西澤かな枝	放射線医学総合研究所 人間環境研究部	～1998.3.
藤高 和信	放射線医学総合研究所 第3研究グループ	
馬嶋 秀行	放射線医学総合研究所 第3研究グループ	1998.4.～
保田 浩志	放射線医学総合研究所 第3研究グループ	
山田 滋	放射線医学総合研究所 治療診断部	1998.4.～

報告書・主 部

## 報告書・主 部

### 序

(1)近年の高高度飛行技術の急速な進展に伴い、飛翔体搭乗者(宇宙飛行士、航空機乗務員、等)が地上とは異なる線質の宇宙放射線によって被ばくする機会が増加してきた。本委員会は、それら飛翔体搭乗者を宇宙放射線による被ばくから適切に防護するための体系を構築することを主たる目的として、1996年度に放射線医学総合研究所内に設置された。

(2)本報告書は、宇宙放射線防護の概念的枠組みや今後重点をおくべき研究面での取り組みを明確に示すことを狙いとして、これまでの約1年半の活動で得られた成果を基に本委員会がまとめたものである。本報告書の内容は、委員会および部会において審議・了承された。

(3)本委員会において、これまで報告・審議されたテーマ(審議順)は以下の通りである：

1. 国際宇宙ステーション(ISS)計画の概要
2. 高高度航空機飛行に伴う被ばく
3. 航空機乗務員の健康管理について
4. 今後の有人宇宙開発計画
5. 実効線量の算定方法にかかる問題点
6. 宇宙粒子線の生体リスク評価における課題
7. NASDAによる宇宙放射線計測結果(速報)
8. 第2回 ISS放射線モニタリングWSからの報告
9. 宇宙放射線を利用した研究について
10. 医療における放射線被ばくの現状
11. 低線量リスクの評価モデル

12. ロシア宇宙船・ミールでの線量測定結果(速報)
13. 人体内元素の動態に関して
14. 骨代謝に及ぼす放射線の相乗作用
15. 宇宙放射線防護にかかるNASAの考え方について
16. 宇宙放射線計測の現状と課題
17. 粒子線の生物影響

(4)本報告書の草案は委員会事務局によって準備された。内容は1997年度委員会によって審議検討され、1998年3月に採択された。

#### 1997年度本委員会メンバー：

飛鳥田 一 朗  
安 藤 興 一  
飯 田 孝 夫  
岩 崎 民 子(委員長)  
内 山 正 史  
甲 斐 倫 明  
熊 沢 蕃  
小佐古 敏 荘  
小 村 和 久  
長 岡 俊 治  
西 沢 かな枝  
野 口 邦 和  
藤 高 和 信  
保 田 浩 志

#### 1997年度検討部会メンバー：

阿 部 貴 宏  
甲 斐 倫 明

熊 沢 蕃  
西 沢 かな枝  
野 口 邦 和  
藤 高 和 信(部会長)  
湊 進  
保 田 浩 志

(以上50音順)

## 1. 緒 言

(5)これまで40億年近くの間地球上生物にとって未知の領域であった宇宙空間に、今、ヒトという種が活動の場を広げようと、あらゆる英知を集めて挑んでいる。数年後には国際宇宙ステーションの完成・利用、21世紀初頭には火星基地の建設も視野に入れた有人火星ミッション等の大型プロジェクト等が計画されている。

(6)しかし、有人宇宙活動がますます活発になるに伴い、宇宙での滞在に伴う様々な危険性も上昇していくことは否定できない。特に、遺伝子の本体であるDNAを直接的に損傷し得る宇宙放射線は、最も懸念される危険のひとつである。

(7)本委員会は、「なぜ危険を冒してまで宇宙に行く必要があるのか」という批判があることを承知している。その批判に対し、本委員会は、潜在的な便益を考慮することの重要性を強調したい。多様化し拡張していく地球上生物の一員として、宇宙に活動の場を広げることが、ある程度のリスクと引き換えに次の世代に大きな便益をもたらす可能性を信じている。そして、その便益を安心して享受できるよう、宇宙での滞在がもたらし得る健康障害を未然に防ぐことに重点的に取り組むべきであると考えている。

(8)本委員会は、飛翔体搭乗者(宇宙飛行士、航空機乗務員、等)を宇宙放射線による被ばくから適切に防護するための体系の確立を主な目的として設置された。具体的には、以下に挙げるような研究分野について取り組むべき課題を明確化し、それらを効率的に推進することを狙いとしている：  
・宇宙放射線被ばく防護に関する基本的考え方

(安全解析研究課題の明確化)  
・宇宙放射線リスクの評価手法  
(物理・生物学研究課題の明確化)  
・宇宙放射線被ばくの低減対策  
(工学・医学研究課題の明確化)

(9)本委員会におけるこれまでの議論から、宇宙放射線防護には、既存のものとは異なる新しい体系の構築と組織的な取り組みが必要であることが認識されてきた。本報告書は、委員会で議論された内容を参考にしながら、今後の宇宙放射線防護にかかる考え方や指針をまとめたものである。

(10)本報告書では、特に、1998年度から建設が開始される国際宇宙ステーションに長期間滞在する宇宙飛行士の放射線防護をはかることを念頭に検討・記述した。宇宙ステーション滞在では地上における職業人に対する線量限度を超える恐れがあるため、その防護は緊急の課題と認識されるからである。

(11)また、宇宙ステーションでは、複数国の宇宙飛行士が同一空間で居住することになるため、そこで適用される基準は、全参加国共通の理解と承認に基づいて定められるべきである。本委員会は、国際的な議論の前段階として、日本人宇宙飛行士の放射線防護に関するわが国の姿勢を明確化することに貢献したいと考えている。

(12)本委員会は、航空機搭乗員、特に運航・客室乗務員について、放射線防護の新しい枠組みが必要であると考えている。例えば航空機乗務員に職業被ばくを適用するかどうか議論される必要がある。また、航空機利用者の数は宇宙飛行士に比べて格段に多いため、運航・客室乗務員も含めた集団線量の低減の見地から何らかの対処が必要であると思われる。しかし、現時点では、1人あたりの被ばく線量は低く、放射線が健康に及ぼす影響は他の要因と比較して相対的に小さいと考えられるため、本報告書では議論の対象外とした。航空機搭乗者の放射線防護については、本委員会で引き続き審議していく予定である。

(13)本報告書は、現時点での見解および具体的指針を述べた主部と、主部を理解する上で必要な情報を記した付録部の2部から構成される。主部は7章から成り、第2章では宇宙放射線被ばくの特殊性を、第3章と第4章では人体影響の予測評価における問題点を論じている。第5章では宇宙飛行士の放射線健康管理のあり方について述べ、第6章では防護基準に対する姿勢について言及している。最後の第7章では、本報告書の主旨を提言の形で要約した。主部に続く付録部では、米国放射線防護測定審議会(NCRP)の許可を得て、1997年に出版されたNCRPレポートの一部を抜粋・翻訳して記載した。

(14)本委員会は、宇宙飛行士の放射線防護にかかる概念的枠組みや取り組むべき課題を示すことにより、本報告書が今後の有人宇宙開発の健全な発展に役立つことを期待している。

## 2. 宇宙放射線防護の概念的枠組み

(15)宇宙放射線は自然放射線の一つではあるが、飛翔体搭乗者の被ばくは、行為によって線量が増加するタイプの自然放射線被ばくとして分類できる。

(16)宇宙空間においては、線量を低減するための「遮蔽」「距離」「時間」の制御は一般に困難であり、宇宙放射線特有の対処が必要と思われる。ただし、任務の遂行に支障をきたさない範囲で、ミッション回数の制限によって被ばくする時間を減らすことは可能である。

(17)未知の場を探求する意味合いが強い有人宇宙活動においては、将来の世代にもたらされるであろう潜在的な便益を考えるべきである。したがって、本委員会は、宇宙放射線被ばくに関する正当化・最適化についての定量的な議論を行うことは、現段階では困難であると考えている。

(18)ただし、いかなる条件においても、放射線被ばくは「合理的に達成できる限り低く」保つことを基本姿勢とするべきである。例えば、任務の遂

行と関係のない不要な被ばくは、極力回避されるべきである。また、線量の低減をはかるためにミッション時期や航路を変更することも、実施可能な範囲で検討するべきである。

(19)国際放射線防護委員会(ICRP)は、放射線防護の目的を「確定的影響の発生を防止し、確率的影響の発生を制限することである」としている。国際宇宙ステーションでは、線量率の低さから確定的影響が起こる可能性は極めて低いと判断されるが、巨大な太陽フレアの発生時における対応には留意しておくことが望まれる。当面の有人宇宙活動では、確率的影響、特に発がんからの防護が主な検討対象になると考えられる。

(20)しかし、宇宙放射線の線質が地上とは大きく異なること、宇宙では線量-反応関係が変化し得ること、放射線以外の宇宙滞在に伴う要因(微小重力、生理的ストレス、等)が働く可能性があること、等の不確かさから、発がん以外の予期しない身体的影響が生じる可能性も否定はできない。宇宙放射線被ばくに対しては、既存の防護体系に必ずしも組み入れられない、特別なスタンスを新たに構築するという選択肢が認識されるべきである。

## 3. 宇宙放射線の線量評価手法

(21)現時点では、宇宙放射線による被ばくが健康上問題となり得るのは、少数の宇宙飛行士に限られている。したがって、宇宙飛行士の放射線防護では、飛行士が活動する空間の放射線場を厳密に把握し、各飛行士の個人線量を正確に測定評価することが重要である。

(22)地上での人工被ばく源は主としてX線およびγ線であるため、放射線が人体にもたらす健康リスクは、ほとんどがX線やγ線を対象とした疫学データに基づいて評価されてきた。その主な源は、広島・長崎の原爆関連のデータである。しかし、宇宙空間での被ばく源は、荷電粒子(陽子・重粒子)線およびそれらが飛翔体構造物と反応して生じる中性子線等の2次粒子であり、現時点では、それらがヒトの発がんリスクに及ぼす影響につい

ては大きな不確かさがある。

(23) 生体・組織が受ける影響という観点から考えると、それらの粒子線が持つ特徴は、飛跡に沿った電離密度が大きいこと、飛程終端近傍で集中的にエネルギーを与えること、等が挙げられる。また、高エネルギーの粒子線は、物質中で相互作用しながら2次粒子を大量に発生させる。さらに、宇宙飛行士は、放射線治療時のように一方向のビームで短時間集中的に照射されるのではなく、地表での自然放射線の100倍程度の線量率で連続的に、ほぼ等方的に全身被ばくを受ける。このような、地上とは線質や被ばくのパターンが異なる宇宙放射線に対して、既存の線量評価手法が妥当かどうかは、現時点では明らかではない。

(24) ICRPの1990年勧告では、ある組織・臓器の平均吸収線量に、放射線荷重係数 $w_R$ を乗じて求められる線量を等価線量、各組織・臓器の等価線量にその組織・臓器の組織荷重係数 $w_T$ を乗じて足し合わせた線量を実効線量とし、この実効線量値を放射線リスクの評価尺度とすることが勧告されている。本委員会は、実効線量に基づいた評価手法が、計測上の困難さはあるものの、宇宙飛行士を放射線の確率の影響から防護する上での概念的枠組みとして適当であると考えている。

(25) 各組織・臓器が受ける放射線の線エネルギー付与 $L$ の分布が正確に把握できるならば、線質係数 $Q$ を用いた評価が可能である。しかし、 $Q$ - $L$ 関係に含まれる生物学的な不確かさと、体内の $L$ の分布を正確に予測することの困難さから、 $Q$ を用いることが $w_R$ を用いることよりも妥当であるとは考えにくい。現段階では、どちらかを暫定的に用いることとし、基礎データの取得に努めながら、宇宙放射線に適した計測・評価体系の整備を進めていくべきである。

(26) マクロな吸収線量に加え、生物組織内の微小な体積における事象の統計的分布に基づいた考察を行うことも、評価の信頼性を向上させる上で有効であろう。既に、計算機技術の発達やマイクロドシメトリー分野の研究の発展により、放射線

の生物学的影響に関するDNAレベルでの機構の解明が進みつつある。これらの微視的な考察を放射線リスクの評価へ反映させていく姿勢が望まれる。

#### 4. 宇宙放射線防護の物理・生物学的側面

(27) 本委員会は、宇宙放射線被ばくの低減が、今後の長期にわたる有人宇宙活動で最も重要な検討事項のひとつであると認識している。しかし、宇宙放射線の人体影響に関する判断の基礎となる定量的知見は明らかに不足している。

(28) 宇宙飛行士の線量を評価する上で重要な対象となるのは、陽子及び重荷電粒子線、それらが構造物を通過する際に生じる2次粒子である。国際宇宙ステーションの高度(約400km)では、ブラジル沿岸上空の南大西洋磁気異常地域(SAA)における捕捉放射線帯粒子、極地方近傍での銀河宇宙線の増大が特に問題となる。線量率および線質は11年周期の太陽活動によっても大きく変化し、高エネルギー重粒子線の寄与が大きい銀河宇宙線成分は太陽活動極小期に最大となる。通信衛星に機能異常をもたらすような大規模な太陽フレアも1周期内に数回発生している。

(29) 線量の測定値あるいは推定値から宇宙飛行士の健康影響を論じるためには、影響予測に有効な情報を正確に得るための宇宙放射線測定技術が不可欠である。その技術の開発・選択にあたっては、評価体系の構築と連携した、「線質として何を測るべきか」についての議論がまず必要である。

(30) 放射線量測定にあたっては、周辺線量、個人線量(船外/船内)、線量の空間分布(マッピング)等の計測量それぞれに、より優れた方法を開発・選択するべきである。通常、異なる計測量には異なる測定法が適していることを認識するべきである。

(31) 空間のある1点における吸収線量、すなわち皮膚の等価線量の計測にかかる不確かさについては、かなり低減されてきている。空間線量の不

確かさは、構造物の厚みや機器類の配置状況の違いがもたらす、線量の空間分布の不均一性に主として起因すると考えられる。

(32) 一方、放射線防護を目的とした線量評価上重要なのは、1点において測定された線量ではなく、体内の各組織・臓器が受ける吸収線量を放射線と組織の種類に応じて重みづけして足し併せた合計量である。宇宙飛翔体内で測られたある1点の空間線量値を個人線量に精度よく結びつけることは現時点では困難であり、人体ファントムを用いた実験等を通してその換算を可能にするためのデータの蓄積をはかる必要がある。また、体表面で得られた測定値から体内の線量分布を正確に記述・予測できる数学モデルの確立が必要である。

(33) 各粒子のエネルギースペクトルが得られる場合には、単一粒子・エネルギーについて定めた実効線量への換算係数を整備しておくことが有効である。ICRPの1990年勧告では、陽子線および重粒子線にかかる放射線荷重係数を、それぞれ5および20と与えているが、宇宙放射線に対する評価に用いるには、粒子の種類ごとに、幅広いエネルギー範囲での詳細化をはかる必要がある。また、各臓器・組織の等価線量を $Q$ - $L$ 関係(ここに $L$ は線エネルギー付与 $LET$ である)に基づいて定める際には、入射粒子の情報から各臓器・組織の $L$ 分布を予測評価する段階で大きな不確かさが伴うことに留意すべきである。今後、体内での破碎反応を記述するための基礎データの取得に重点的に取り組む必要がある。また、身体の高さや姿勢の影響についても定量化し、線量評価の精度化をはかる必要がある。

(34) 組織荷重係数については、宇宙空間では微小重力等の影響により値が変化する可能性があることを認識し、その解明に努めるべきである。

(35) 実効線量から発がんリスクへの換算係数についても同様に、宇宙での値を明確にするため、宇宙飛行士を対象とした疫学的調査を慎重かつ系統的に実施していくべきである。

(36) これら発がんリスクの予測評価に関する取り組みと併せて、将来起こり得る様々な状況を想定し、遺伝的影響や確定的影響に関する調査研究も進めておくことが望ましい。

(37) 宇宙放射線が生体に及ぼす影響のメカニズムについては、議論の基礎となる知見が明らかに不足しており、緊急かつ系統的に知見の集積をはかるべきである。本委員会は、特に、宇宙環境特有の条件に起因する、以下のような課題に重点的に取り組む必要があると考えている：

- ・低線量率での粒子線の長期被ばくがもたらす人体への影響
- ・低～極高 $LET$ 放射線の混合被ばくがもたらす影響
- ・微小重力やミッションに伴う様々なストレス要因との複合作用

(38) 生物学的な影響を論じる上においては、生体が本来持つ多様性に関する考察が重要であり、個体や健康状態の違いに起因するばらつきと、情報の不足に起因する不確かさは区別して扱うべきである。

(39) 宇宙放射線の生物影響を定量化するためには、宇宙で受ける各要因について綿密な比較対照を可能とする、計画的・系統的な実験が重要である。機会の限られた宇宙実験で得られる成果は限られており、粒子線加速器等を活用した、宇宙放射線環境を模擬した条件でのデータの蓄積が不可欠である。

(40) 宇宙放射線の人体影響解明を目的とした研究は、より効率的に進めるため、有人宇宙開発の先進国である米国やロシアとの友好な協力関係を軸として、研究資源や実験機会を相互に有効利用しつつ実施していくべきである。

(41) 特に、放医研の重粒子線がん治療装置(HIMAC)については、宇宙医学研究に利用したいとの諸外国からの要請も高く、今後の宇宙開発において対等な国際協力を展開していくためにも、自ら積極的に国際的な利用に供していく姿勢が求

められる。

(42)さらに、効率的な知見の収集をはかるため、宇宙医学研究にかかる計画調整会合を定期的開催し、各国および各機関が保有する研究成果を共有して総合的に研究を推進するために拠点作りが必要である。

## 5. 宇宙飛行士の健康管理体制

(43)本委員会は、有人宇宙活動を運用管理する側にとって、宇宙飛行士の健康障害を無視できる程度に低減するための誠実な取り組みが何よりも重要であることを強調する。宇宙飛行士の生命にかかわる問題を未然に防ぐ真剣な努力が、活動に携わる飛行士に安心感を与え、健全かつ着実な有人宇宙活動の進展を促すと期待されるからである。

(44)放射線リスクに関する情報を宇宙飛行士へ伝える際には、最新の知見をより正確に伝えると共に、情報の不確かさについても明らかにすべきである。そして、放射線のリスクを運用主体(日本では宇宙開発事業団が相当)や飛行士自身が正當に評価して、適切な対策をとれるよう、補助する態度が必要である。

(45)正確な情報を伝達した後、懸念を示す飛行士に対してミッションを強要することは適切ではない。

(46)現在の宇宙飛行士の健康管理には、十分な配慮が払われていると思われるが、本委員会は、放射線障害のスクリーニングを狙いとした診断を正式に加えることを希望する。

(47)今後の宇宙放射線防護のあり方を論じる上で、現在の飛行士各人の被ばく歴と健康調査結果は、極めて重要な情報となる。本委員会は、それらの情報の、一貫した手法による継続的な蓄積と、積極的な情報の開示を希望する。特に、宇宙飛行士の健康状態について、飛行前と飛行後の比較および長期間の変動について系統的な解析を行うべきである。

(48)健康診断は、滞在期間に関係なく1ミッションごと、ミッションがない場合は、地上の放射線健康管理に準じて1年を超えない期間ごとに実施することが望まれる。飛行士から要求があれば柔軟に対応し、本人へすべての診断結果を通知することを原則とすべきである。

(49)宇宙飛行士の線量-反応関係のデータを系統的に解析していくためには、各飛行士の理解と協力が不可欠である。宇宙放射線防護の専門家は、飛行士の被ばく線量と健康状態に関する情報を収集するにあたって、その意義を本人および運用主体に十分説明することが重要である。また、それらの情報の収集・利用にあたっては、飛行士自身の自主的・積極的な開示を原則とする。

(50)親族の死因状況等から、飛行士の遺伝的な特徴をある程度推定することが可能である。ただし、本委員会は、遺伝的な要因のみに基づいて有人宇宙活動を制限することは、現在の医学的知見の不確かさから正当化されないと考える。運用主体側は、遺伝的な要因で発がん率等が変化し得ることを飛行士に伝え、飛行士自身による判断を促すべきである。

## 6. 有人宇宙活動における防護基準

(51)本委員会は、宇宙放射線被ばくの防護についての議論が国際的規模で活発に行われ、遅くとも国際宇宙ステーションの完成までには、全参加国共通の理解と承認を経て、宇宙放射線に対する防護体系と基準が確立されることを望んでいる。

(52)防護基準値を含む国際的な宇宙放射線防護の体系を構築するためには、放射線分野の研究者が盛んに交流し協力しあいながら、共通の目標を持って宇宙医学に関する研究に参加し、得られた研究成果について活発に議論する機会を容易に持つことができるような状況作りが不可欠である。

(53)本委員会は、宇宙飛行士の活動の特殊性・重要性、宇宙放射線(陽子線・重粒子線・中性子線)の線量-反応関係に関する不確かさ、それらの粒

子線に対する線量評価体系が確立されていないこと、宇宙環境特有の要因がもたらす予期しない身体的影響の可能性、等を考慮し、放射線防護のための線量限度値の勧告は現段階では行わない。

(54)本委員会は、宇宙飛行士に適用する防護基準値は、社会的・経済的な要因や長期の宇宙開発計画案を含めた総合的な判断によって設定されることが望ましいと考えている。また、その基準値は、今後の知見の集積に伴って変更され得ることが強調されるべきである。

(55)本委員会は、長期宇宙滞在の実現を潜在的な便益と認識し、防護基準の策定に関して以下の提案をする：

- ・放射線防護のための基準値は、ミッションの種類や状況に柔軟に対応できる運用上の基準として与えること
- ・宇宙飛行士の線量限度としてはまず生涯線量限度を定め、各飛行士について短期ミッションにおける基準値の合計がこれを超えないよう配慮すること
- ・線量から発がんリスクへの換算係数は、当面は暫定値として定義すること

(56)短期間のミッションに対する基準値は、発がんリスクを十分に低減する範囲で、船外活動を伴う極めて重要な任務の遂行に支障をきたさないよう、慎重に決定するべきである。また、運用管理上の問題や今後の生物学的知見の集積によって、将来変更され得ることを明記するべきである。

(57)船外活動時の太陽フレアの発生に備え、基準値には柔軟性を付加することが適当と考えられる。例えば、通常の線量率管理に加え、突発的な事象や事故を想定して、短時間曝露限界値や緊急時曝露限界値を設けることを提案する。

(58)宇宙放射線の人体影響については、まだ不確かな点が多い。今後、様々な影響に関する知見の集積や有人宇宙活動形態の変化等に伴って、発がんのみを考慮している現在の体系が変化することも十分考えられる。そのような状況の変化に柔

軟に対応できるよう配慮しておくべきである。

## 7. 結 語

(59)本委員会は、宇宙放射線被ばくにかかる安全性向上がさらにはかられることを期待している。しかし、そのための対策と費用がトレードオフの関係にあることも認識している。今後の宇宙開発の進展には、国民の支援が不可欠の条件であり、積極的・継続的な情報公開と正確な情報伝達等によって、有人宇宙活動の魅力と運用管理側への信頼が維持向上されることを望んでいる。

(60)本委員会では、宇宙における長期滞在の実現が将来の世代に大きな便益をもたらす可能性を認識している。そして、有人宇宙活動を過度に制限することなく、宇宙放射線による被ばくがもたらす健康障害から宇宙飛行士を適切に防護していくことの重要性を強調する。そして、日本人宇宙飛行士の宇宙長期滞在が開始される21世紀初頭までに、実用的な宇宙放射線防護体系を確立しておくべきであること、そのために基礎研究から運用管理に及ぶ体制の強化および国際化をはかるべきであることを提言する。

(61)本委員会は、以下に述べる事項に特に重点をおいて取り組む必要があると考えている：

1. 宇宙放射線防護の概念的枠組みの構築：飛翔体搭乗員の被ばくは、行為によって線量が増加するタイプの自然放射線被ばくのひとつと定義し、不要な被ばくの回避を基本原則とすること。
2. 健康リスク評価手法の確立：最新の物理学的・生物学的な知見に基づき、宇宙放射線被ばくの線量評価法およびその健康リスクを表す指標を確立し、基準化すること。また、その評価体系は、今後の知見の集積によって変更され得ることを明記すること。
3. 科学的基礎データの充実：現在極めて不足している宇宙放射線の生物・物理学的影響に関するデータを、宇宙実験および地上加速器実験との比較検証等を通して系統的に収集すること。また、既に有人宇宙開発を実施して

きた米国やロシア等との研究面での協力を軸として、研究資源や実験機会を国際的規模で有効利用しながら、効率的な知見の収集をはかること。その際には、宇宙開発において対等な国際協力関係を形成するため、放医研 HIMAC等、海外より利用要請のある優れた国内施設設備を国際的利用に供していくよう努力すること。そして、各国および各機関が得た知見を互いに共有し、発がんに関する数理モデルをはじめとする、宇宙飛行士の健康影響を正確に予測・低減するための信頼できる体系を構築すること。

4. 健康管理体制の整備：宇宙飛行士各人の生涯にわたる健康状態を、被ばく線量と併せて定期的に調査するとともに、診断結果や将来起こりうる影響を宇宙飛行士に正確に伝達し、心理的側面も含めた健康保持に有効な活動を促すこと。

5. 防護基準のあり方：宇宙放射線の人体影響については今後解明すべき段階にある点を考慮し、生涯線量に対する限度値を定め、比較的短期間の被ばく管理は、柔軟性を付加した運用上の基準値で行うこと。

(62)上記5点の事項は、実際に有人宇宙活動を運用しながら適宜見直し、状況に応じた適切な内容に改善されるべきである。

(63)本委員会は、本報告書が、宇宙放射線防護の基礎となる指針を提供することにより、宇宙飛行士を含む運用主体が、宇宙放射線被ばくにかかる現状と問題点を正しく認識し、その低減に努められることを期待している。そして、宇宙放射線防護に関する国際的な標準体系が数年内に確立され、一般公衆も対象とした将来の有人宇宙活動の健全な進展に役立つことを願っている。

## 報告書・付録部

\* 付録部本文は、NCRP Symposium Proceedings 3: "Acceptability of Risk from Radiation—Application to Human Space Flight (NCRP, 1997)"に記載されている内容の一部を、NCRPの承認を得て、本委員会が和訳・監修したものである。

## 宇宙放射線防護基準の歴史

### History of the Development of Radiation Protection Standards for Space Activities

Warren K. Sinclair (NCRP)

#### 概 要

全米科学アカデミー／米国学術研究会議(NAS/NRC)の宇宙医学委員会の放射線生物学諮問委員会は、1970年に宇宙における放射線被ばく限度に関する勧告を行った。当諮問委員会はリスクベースのアプローチに基づいて各種要因を考慮し、生涯線量限度4 Svを勧告した。遺伝的な影響については、該当する人が少数であり、その大部分が30歳を超えているので、大きな問題とはされなかった。その後の疫学的研究の成果に基づいて、リスク係数の値が高められた。この出来事およびその他の状況を考慮して、NASAは1980年代にNCRP(米国放射線防護測定審議会)に対して宇宙飛行士を防護するためのリスクと理念の再検討を依頼した。NCRPはその課題を遂行するに当たり、搭乗員とペイロードスペシャリストが受ける放射線被ばくを職業リスクとして扱い、放射線作業従業者や他産業の作業者が受けるリスクと同列に評価することを決定した。安全性は低い、最も危険とはいえない職業に従事する作業員では、死亡の平均生涯リスクが約3%であることを考慮して、NCRPは宇宙飛行士の合理的な生涯線量限度は、生涯絶対過剰致死率が3%のリスクを基準とするべきであると結論した。NCRPはこの数値を基準として、25歳の女性で1 Sv、男性で1.5 Svの生涯線量限度を勧告した。被ばく開始年齢が高い

ほど危険度は下がるので、初期被ばくが55歳の場合には、女性で3 Sv、男性では4 Svが最大の生涯線量限度となる。この勧告は全年齢について約 $2 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ の致死性癌発生の生涯リスクの名目推定値に基づいている。1988年から1993年までの間に電離放射線による癌死亡のリスクに対して大幅な改訂が行われたが、その結果リスク係数は再び高められた。これらの理由でNASAはNCRPに対して再調査を要請した。現在、地上の放射線作業従事者に関するICRP(国際放射線防護委員会)勧告は、ほぼ4%の致死性癌生涯リスクを許容している。これに対応するNCRP限度では約3パーセントを許容レベルとしており、地上の放射線作業従事者と比較して、宇宙飛行士の生涯リスクを約3%以下に限定するのは適当ではないと思われる。NCRPは、新しい生涯線量限度に関する勧告を行う前に、これらの重要な事項を、他の問題も考慮しながら検討する必要に迫られている。

#### まえがき

宇宙における放射線防護基準は、地上の基準とはやや異なる方法で設定されてきた。宇宙における被ばく線量率は、銀河放射線、地球近傍の放射線捕撈帯、太陽粒子放出(SPE)(Robbins, 1996)などにより、地上における自然被ばく線量率と比較して、はるかに数値が高い。宇宙での放射線被ばくを少なくすることは困難であり(地上の人工



放射線源の制御と比較して),完全に無くすことは不可能である。さらに宇宙の熾烈な環境が人間に及ぼす異種リスクは、放射線による危険より急激かつ重大である。このため宇宙放射線のリスクは異なる様相を呈する。まず、宇宙での任務遂行に支障をきたす急激な放射線影響はありうるのだろうか。答えは勿論否であるが、巨大な太陽フレアがもたらす潜在的影響に対する備えは必要である。さらに直接の確定的影響をなくすため臓器の被ばくに対する限度も必要である。しかし宇宙における主な放射線リスクは、たとえば90日間の宇宙活動中に受ける100mSv台の低レベル被ばく線量の累積と、その結果発生する確率的影响のリスクである。そして、問題となる確率的影响は主として癌の誘発である。妊娠時年齢は通常30歳までであり、十分な訓練を受ける宇宙飛行士の年齢はこれより高くなるので、遺伝的影響が現れる可能性は低い。カウンセリングによってもこの影響は抑えることができる。

宇宙放射線の防護基準の設定にあたっては、地上での放射線防護基準の進展に関して理解を深めることが有効である。

## 地上における放射線防護基準

放射線関連業務に従事する作業者と、人工放射線源に偶発的に被ばくする一般大衆を防護するための基準は過去100年以上にわたって検討されてきた。これらは電離放射線被ばくを可能なかぎり避けるという常識的原理に基づいたもので、被ばくが急性(確定的)影響のしきい値を超えないことを確保し、晩発(確率的)影響のリスクを合理的な値に限定するものである。国際放射線防護委員会(ICRP)や米国放射線防護測定審議会(NCRP)などの専門機関は、放射線防護に関する生物学的情報の評価、放射線利用者の利益ならびに究極的には政府の規則策定のための諸基準の勧告などにおいて他に先んじている。

現在これらの基準設定に対する主な対象は確率的影響、すなわち遺伝的影響と発癌である。この仮定は、低線量においては発癌あるいは遺伝的影響の発生頻度は被ばく線量に正比例することに基づいている。この仮定の正当性を証明する証拠は数多くあるが、極低線量におけるわずかな影響を

観察するには統計的問題があるので、この仮定に関してはいろいろ異論がある。数量的には致死性癌誘発のリスクは線量に関連することが多く、これは現在すべての年齢層に対して平均約 $5 \times 10^{-2}$  Sv<sup>-1</sup>と推定されている。これに対応する遺伝的影響は $1 \times 10^{-2}$  Sv<sup>-1</sup>とされている。これら二つの要素は低線量における健康に有害な影響となる主な要因であり、これが放射線作業従事者の線量を年間50mSv以下まで、従事者の年齢を問わず累積総線量を作業従事年数(年数) $\times 10$ mSv以下とするNCRPの勧告となったのである(NCRP, 1993)。一般大衆に対しては、いかなる1年を検討しても年間5 mSv以下、長期間では平均1 mSv y<sup>-1</sup>以下とするよう勧告している(NCRP, 1993)。さらに特定の臓器に対する確定的影響を防止するため、個別の臓器線量限度を勧告している。

これらの限度レベルによって、放射線作業従事者は平均約2 mSv y<sup>-1</sup>以下の線量を受け、一般人は平均約0.5mSv以下の被ばくを医療用を除く人工放射線源から受けることになる。アメリカ国内の放射線作業従事者と一般人はいずれも、平均3 mSv y<sup>-1</sup>レベルの宇宙線、平均的な地殻ガンマ線、ラドンを含む体内放射性核種などの自然放射線被ばくを受けている(NCRP, 1987)。一般公衆は医療線源を含む人工放射線源により更に約0.6 mSv y<sup>-1</sup>の被ばくを受けている(NCRP, 1987)。

## 初期の宇宙放射線基準

1960年には宇宙活動に伴う放射線被ばくの問題に関する初期の論文(Langham, 1960)が発表され、宇宙における放射線生物学的危険性を詳細に考察した最初の書籍「有人宇宙飛行の放射線生物学的影響」が、Wright Langham監修で全米科学アカデミーが主催する委員会によって編集された。この書籍は、1967年に発行されたが、当時の放射線生物学的知見を総合的に要約したものである(NAS/NRC, 1967)。そこでは特に放射線防護の基準は提示していないが、宇宙における人間の放射線被ばく管理において考慮すべき事項を述べている。

「宇宙医学に関する宇宙科学委員会」のNAS/NRC放射線生物学諮問委員会が、宇宙で使用する

放射線防護の手引きの作成を要請された1970年には、発癌リスクの概念と放射線防護におけるその重要性はすでに広く認識されていた(ICRP, 1969; NCRP, 1954)。この委員会は、地球を離れ宇宙を旅行する場合には他の重大な危険に伴い、放射線の危険は最大の関心事ではないと考えていた。(これは後に証明された。)とはいえ、主な放射線リスクである癌誘発の晩発的影響は、宇宙飛行士が地球帰還後も長期にわたり続くであろうし、また別な急性障害のあるものが残っている。そこで指針に対する妥当な基準が必要になったのである。委員会は自分たちが参考リスク(reference risk)と呼ぶものを決定した。「関係者数の多少、種々のリスク対効果の評価、活動の複雑性の程度などを考慮した、計画と活動における標準化の一基準として使用される一次的参照リスクを勧告することが妥当であると思われる」とした。この委員会はこの考えをさらに進めて次のような結論に達した(NAS/SRC, 1970)。

表1 単位参考リスク条件に対する推奨被ばく限度と被ばく累積率拘束値<sup>a</sup>

拘束	補助的参考リスク				
	主要参考リスク	骨髄 5cm深さ (rem)	皮膚 0.1cm深さ (rem)	水晶体 3mm深さ (rem)	精巣 3mm深さ (rem)
1年間 平均日量		0.2	0.6	0.3	0.1
30日間 最大		25	75	27	13
四半期 最大 <sup>b</sup>		35	105	52	18
1年最大 生涯限度	400	75 400	225 1,200	112 600	38 200

<sup>a</sup> NAS/NRCより

<sup>b</sup> 年限度を維持するため6ヶ月間被ばくを避けた後では、連続2四半期の被ばくも許容されるであろう。

表2 1982年と1970年のリスク予測の比較<sup>a</sup>

	白血病 (Sv <sup>-1</sup> ) 20y	固形腫瘍 (Sv <sup>-1</sup> ) 20y	全癌 (Sv <sup>-1</sup> ) 20y	自然リスク の対象年齢 範囲での予測 35-55y	自然リスクを 2倍にする線量 (Sv)
1970	$3 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$	$23 \times 10^{-3}$	4
1982低線量	$2 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-3}$	$23 \times 10^{-3}$	2.4
1982低線量	$5 \times 10^{-3}$	$20 \times 10^{-3}$	$25 \times 10^{-3}$	$23 \times 10^{-3}$	0.9

<sup>a</sup> Sinclair, 1983より

「具体的には、当委員会は次のとおり提案する、すなわち主要参考リスクは、検討中の特定母集団に対する自然発生確率に等しい約20年間にわたる放射線誘発新生物の過剰確率に対応すべきである。またこの過剰リスクは宇宙活動に関連している全ての放射線源から受ける総リスクに比較して低いであろうとの見解を持っている。しかし当委員会は特に、この過剰リスクの程度がある任務に関しては許容されるとか、あるいはこの過剰リスクが予測される利益と相殺できるという判断は避けることを明らかにしておきたい」

当委員会は、当時のアメリカ合衆国統計から、35歳から55歳の男性の20年間にわたる致死性癌のリスクは約2.3パーセントであると決定した。したがってこのリスクが2倍になると線量を次のように定めた：

「放射線誘発白血病のリスクを $1.5 \times 10^{-6}$ /rem/yとし、その他の新生物のリスクを同じと仮定すると(総リスク $= 6 \times 10^{-5}$ /rem/20y)、35歳から55歳までの間に新生物の自然発生リスクが2倍になるための全身被ばく線量は $2,300 \times 10^{-5} \div (6 \times 10^{-5}) = 383$ レムである。このため主要参考リスク(すなわち35歳から55歳のアメリカ合衆国の白人男性母集団の35歳から55歳までの20年間の悪性腫瘍による自然死亡リスクに等しい過剰リスク)に関連する被ばく量を、骨髄の平均深度(5 cm)における400レムの線量当量とすることを提案する」

委員会は、この生涯線量限度に加え、SPEなどによる短期間被ばくを想定した特定臓器に対する限度値(表1)を定めた。

これらの勧告はアメリカ航空宇宙局(NASA)に対してほぼ20年間にわたり指針を与えてきた。

表3  $3 \times 10^{-2}$ の過剰癌死亡率リスクに基づいた生涯実効線量当量限度(NCRP, 1989)

年齢(y)	女性(Sv)	男性(Sv)
25	1.0	1.5
35	1.75	2.5
45	2.5	3.2
55	3.0	4.0



## 新しい宇宙放射線基準(1989)

その間、放射線による発癌リスクの予測は、英国における強直性脊椎炎患者や日本における原爆被爆者などに関する研究からより多くの情報が得られるようになり、変化してきた(NAS/NRC, 1972; 1980; UNSCEAR, 1972; 1977)。同じ基本方針の参考リスクを採用したとしても、1982年現在のリスク予測は慢性被ばく(積算)235レム、あるいは急性被ばく94レムに生涯被ばく量を下げることがあったと、Sinclair(1983)が最初に指摘している(表2)。

NASAはこのような状況を考慮して、1980年代初めにNCRPに対して宇宙の放射線リスクに関する問題の再検討と、生涯被ばくの限度に対する適切な指針を勧告するよう要請した。この作業の結果発表されたNCRPの報告書(NCRP, 1989)は、宇宙における放射線環境、予想される放射線生物影響、年齢と性別のリスク予測の基準、及び宇宙飛行士の生涯限度、特に低地球軌道における限度に関する勧告、などを取り扱っている。宇宙における放射線被ばくは職業的リスクであるが、種々の理由から地球上の放射線作業従事者に関して勧告されている被ばく線量限度を適用することは適

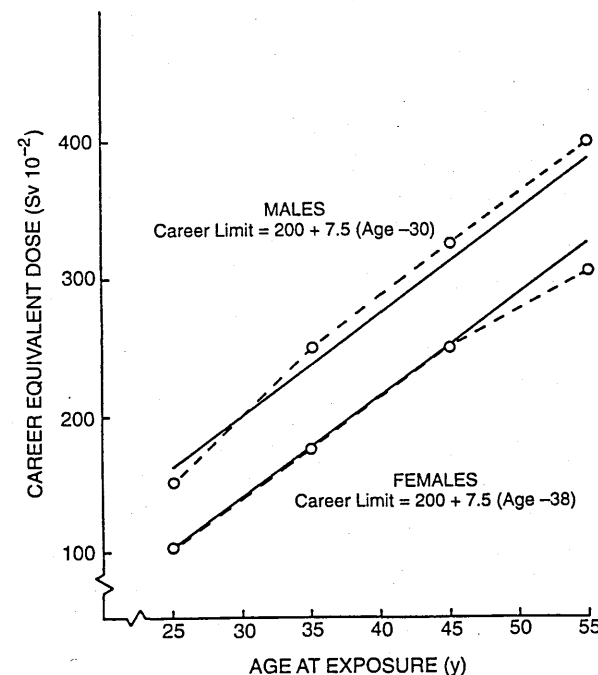


図1 生涯線量限度と年齢との関係

表4 確定的影響を防止するための短期線量当量限度と生涯線量限度(Sv) (NCRP, 1989)

期間	BFO <sup>a</sup>	水晶体	皮膚
30日間	0.25	1.0	1.5
年間	0.50	2.0	3.0
職業従事期間	表3. 参照	4.0	6.0

<sup>a</sup> 造血器官。この用語は、皮下5cmにおける線量を表すために利用されてきた。

切ではないことが認識された。「合理的に可能な限り低く(ALARA)」の原則については引き続き勧告されている。

癌は主要なリスクであり、生涯線量限度は癌発生のリスクが生涯癌死亡率で3パーセントを超えないことを基本としている。この生涯リスクは、最も安全とはいえない一部の職業と同程度であり、最も危険な職業よりはリスクが低いものである。NCRP報告書No.98(NCRP, 1989)では、この選択の基本となった条件が述べられている。また、年齢と性別によるリスクの違いが初めて考慮され、単一の生涯線量限度に代わる生涯線量限度表が作成された(表3)。これは図の形式(図1)(NCRP, 1989)でも作られていて、表に示されていない年齢についての生涯線量限度を容易に求めることができる。生涯線量限度は約1Sv(若い女性)から4Sv(年配の男性)までに亘っている。重要な臓器に対する確定的影響を防ぐための短期的限度も示してある(表4)。これらの勧告はNASAによって採用され、米国労働省の職業安全衛生管理局(OSHA)が1990年にこれらの補足的基準を承認している。

NASAがこの補足的基準を採用した理由をここに示すことは意味がある。これはつぎの見解に基づくものである。

1. 被ばく集団の限定：補足的被ばく基準は宇宙での作業に従事する搭乗員のみに適用する。先進的な宇宙飛行プログラムの利益は増大する放射線被ばくのリスクを大きく超える。搭乗員の生涯線量限度は一般人より高く、3パーセントの癌致死率リスクより高いものになるであろう。またこの限度は任務遂行中の搭乗員にのみ適用する。

2. 放射線リスクの正式な評価：NASAは各宇宙飛行開始前に、宇宙船外活動(EVA)中の被ばく等を含む飛行前被ばく計算を行う。また、広範囲

表5 年間10mSvを慢性的に10年間被ばくを受けた場合の過剰癌死亡予測；性および年齢別に示してある。

被ばく時年齢	25-34		35-44		45-54		55-64	
	男	女	男	女	男	女	男	女
死亡率(%)								
固形癌	0.31	0.55	0.16	0.20	0.11	0.22	0.078	0.16
白血病	0.066	0.027	0.052	0.028	0.033	0.028	0.023	0.021
全ての癌	0.37	0.58	0.21	0.32	0.15	0.24	0.101	0.18

表6 過剰生涯職業リスクに基づく生涯実効線量限度<sup>a</sup>

被ばく時年齢	実効線量-Sv	
	女性	男性
A.1%過剰リスク		
25	0.2	0.3
35	0.3	0.5
45	0.4	0.7
55	0.6	1.0
B.3%過剰リスク		
25	0.5	0.8
35	0.9	1.4
45	1.2	2.0
55	1.7	3.0
C.5%過剰リスク		
25	0.9	1.3
35	1.6	2.4
45	2.1	3.3
55	2.8	5.0

<sup>a</sup> 表示した年齢から始まる10年間被ばく

の綿密な潜在的な被ばく線量の算定を、各飛行開始前に各要素別に行う。この評価は、提案された宇宙飛行計画とタイムライン(宇宙飛行中のスケジュール)、放射線環境モデル、宇宙船やその構成部品、船内居住者の詳細な質量、配分モデル、さらに放射線輸送プログラムに基づいて行う。各要素は必要に応じて開発が進められ、更新されている。

3. 被ばく記録の管理：宇宙飛行実施中の搭乗員は受動的線量計を常に着用すること。マーカー計画以来の線量測定プログラムの根幹を担ってきたこれらの線量計は、新しい材料や技法の発達にしたがって進歩しつづけてきた。較正方法の国際的比較は継続的に実施されている。最先端の線量測定システムの計画、開発、評価が続いている。さらに広範囲にわたる飛行中被ばくと地上被ばくの記録は、搭乗員1人ひとりの医学的履歴の一部となっている。

4. ALARA原則の遵守：NASAの宇宙放射線分析グループの飛行計画は、搭乗員の受ける線量が「可能な限り低くなる」ことを確保することを目的としている。ALARAの原則は現在までのすべての放射線被ばくに関する基本的設計、開発、試験、実施要素の基礎である。最適な宇宙飛行の成功と搭乗員の安全を確保するための宇宙飛行形態と実験シナリオが開発、評価されている。

5. 正式な運行手順の実行：較正された能動的・受動的放射線測定装置の使用を含む、正式な飛行規範と、偶発的放射線被ばく事故を想定した飛行規則が考案され文書化されている。異常事態や読みとりに対応する要員が待機している。運行時には宇宙飛行担当医との直接対話が含まれている。

## 1989年の放射線基準の再評価

NCRP報告書No.98(NCRP, 1989)とその新しい生涯線量限度が作成された当時、癌の確率係数はその後間もなく高められるであろうし、NCRPのリスク予測の改訂が必要になるであろうことは、すでに知られていた。この変更にはいろいろな要素の重なりがあった。すなわち、日本の原爆被爆者のリスク評価が他のデータを圧倒して新しく出てきたこと、古い線量評価体系(T65D)が新しい線量評価体系(DS86)に代わったこと、時間の経過とともに予想を超えて充実性腫瘍の事例が増えてきたこと、および特定対象者の生涯リスクを監視・予測するために案出された一定相対リスク法(constant relative risk method)の優先利用などである。ここでは対象グループの40パーセントに対しては1985年までの予測で、残りの60パーセントは生涯リスクを予測するためのものである。この新しい予測はUNSCEARにより初めて行われ、

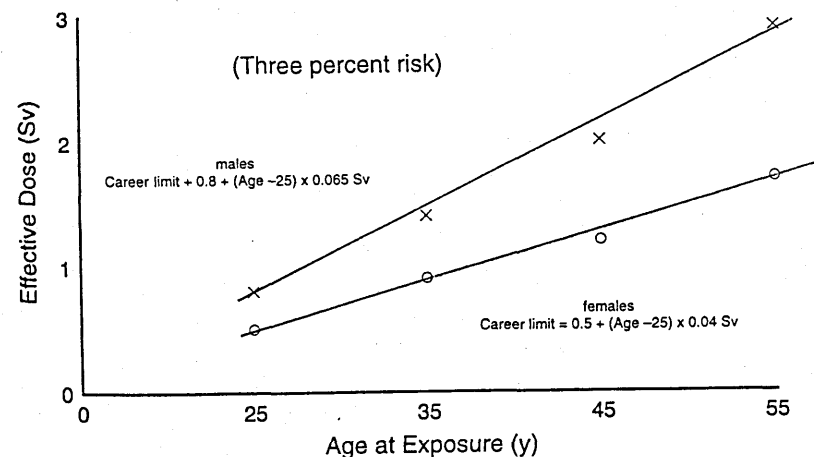


図2 職業的限度対被ばく年齢(10年間)

表7 作業事故率<sup>a</sup>

	1987	1994
農業	49	26
鉱業	38	27
建設業	35	15
運輸業	28	12
製造業	6	4
商業	5	2
サービス業	5	2
官公庁	8	3
全業種 <sup>b</sup>	10	4

<sup>a</sup> 事故情報(NSC, 1988; 1995)

<sup>b</sup> 10万当り10人の年間リスクは $10^{-4}y^{-1}$ 。約50年間では $5 \times 10^{-3}$ すなわち生涯0.5%。

表8 生涯実効線量限度；過剰リスク1.5%

年齢	実効線量 Sv	
	女性	男性
25	0.25	0.4
35	0.5	0.7
45	0.6	1.0
55	0.8	1.5

さらに1994年に再度行われ(UNSCEAR, 1988, 1994), BEIR V委員会によっても行われた(NAS/NRC, 1990)。この結果をICRP(1991)とNCRP(1993)が採用し、地上の作業者に対する新しい職業基準が設定された。

NCRPは未だこの件について合意に達していないが、一つの可能な方法を表5に示す。このリスク予測から、許容生涯リスクのどのレベルにお

いても生涯線量限度(実効線量に基づく)を確定できる。表6は宇宙放射線被ばくによる1%, 3%, 5%の生涯過剰リスクに対応する生涯被ばく線量限度の予測値である。これらを表2の値、報告書No.98の生涯線量限度と比較すると、過剰リスク予測により生涯線量限度がファクター2ほど低下することを示している。図2には、3%の致死性生涯リスクが描かれている。線の傾きは、男性と女性で図1と異なり、年齢と性別の関数としてのリスク評価値の変化を反映している。この図2から、他の年齢の生涯線量限度を求めることができる。

もちろん、1988-89年から1996-97年までの間には技術的進歩があったので、他産業と地上の放射線作業との事故率の比較基準も変化したことを考慮しなくてはならない。1987年の作業事故(NCRP報告書No.98に使用された)と1994年(最新のもの)(表7)の作業事故を比較すると、「安全性のより低い」一般的な職業、すなわち農業、鉱業、建設業、運輸業と、その他の「安全な」職業、すなわち製造業、サービス業、官公庁の両者ともこの7年間に事故率を2分の1に下げた。これは、25年毎に2分の1に下がっていた過去60年間の変化より急速な変化である。

もしこのデータを基本の比較材料とすると、3%の致死性癌の生涯リスクを1/2に下げたいと思うであろう(つまり3%から、1.5%)。とすると生涯線量限度は表8のとおりとなり、その範囲は0.25Svから1.5Svとなる。これはしかし宇宙飛行

士にとって必要以上に厳しい制限である。NCRP報告書No.116(NCRP, 1993)の表-A1では、ICRPが1991年に、NCRPが1993年に勧告した新しい限度値に基づいて、地上の放射線作業従事者の被ばくリスクを比較している。

ICRPは許容できる生涯リスク限度を4パーセント程度としているのに対し、NCRPは約3パーセントとしており、集積線量限度を最も厳しく設定している。したがって地上の放射線作業従事者と比較して、宇宙飛行士の生涯リスクを3パーセント以下に限定することは、合理性を欠くと思われる。この重要な点は、他の問題も含めて、NCRPの委員会およびNCRP自身が新しい勧告を採用する前に検討するべきである。ここで議論されているケースについては、宇宙飛行士や他のNASAの有人活動関係者の意見と理念が、NCRPの判断にとって極めて有用である。

最後に、NCRP報告書No.98(NCRP, 1989)あるいは現在検討中の同報告書の改訂版のいずれかが、放射線管理に関するNASAの経験に特に関心を持って作られたものではないことを指摘したい。米国の宇宙飛行士はこれまで一度も宇宙で高線量の被ばくを受けたことがなく、彼らが受けた被ばく線量はNCRP報告書No.98(NCRP, 1989)で勧告された限度の数分の1に過ぎない。スカイラブ計画における飛行士の最大被ばく線量は43mGyである。宇宙飛行士はこの他に診断用X線や核医学療法による被ばくを受けているが、その一回あたりの総線量は最大で50mSvから90mSvである。ただし、近年これらの診断で受ける被ばく線量は大幅に下がり、1990年の平均では3mSv以下である。ロシアの宇宙飛行士の場合は、米国の飛行士に比較して遙かに高い線量を浴びている。たとえばミール宇宙ステーション内における宇宙飛行士の骨髄での被ばく線量は年間0.55Svに達し得ると推定されており(Robbins, 1996)、実際、ロシアの一部の宇宙飛行士は、ミール宇宙船内の居住が1年を超えている。またロシアでは、被ばく線量の高い南大西洋異常を通過する時は宇宙飛行士がより遮蔽効果の高い位置に移動して、ALARAを実行しているのは興味深い(Petrov, unpublished)。米国宇宙飛行士が115日程度ミール宇宙ステーションに滞在すると、皮膚面で0.1及至

0.2Svの照射を受けることになるであろう。

米国人宇宙飛行士や他の宇宙飛行士は、現行の限度に近い被ばく線量を受けてはいない。しかし、低地球軌道においても現行限度に近い被ばくを受ける可能性が高いことは明らかであり、宇宙における放射線被ばくに関するNASAの方針あるいは国際的方針の一部として、実用的かつ合理的な限度を設定することが極めて重要である。

#### 参考文献

- 1) ICRP (1969). International Commission on Radiological Protection, Radiosensitivity and Spatial Distribution of Dose, Publication No.14 (Pergamon Press, Elmsford, New York).
- 2) ICRP (1991). International Commission on Radiological Protection. The 1990 Recommendation of the ICRP, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21(Pergamon Press, Elmsford, New York).
- 3) LANGHAM, W. (1967). Some Radiation Problems of Space Conquest (Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, Los Alamos, New Mexico).
- 4) NAS/NRC (1969). National Academy of Sciences/National Research Council, Radiobiological Factors in Manned Space Flight.
- 5) Report of a Panel of the Space Science Board, Langham, W.H., Ed. Publication 1487 (National Academy Press, Washington).
- 6) NAS/NRC (1970). National Academy of Sciences/National Research Council. Radiation Protection Guided and Constraints for Space Mission and Vehicle-Design involving Nuclear Systems, Radiobiological Advisory Panel, Committee on Space Medicine, Langham, W. H. and Grahn, D., Eds. (National Academy Press, Washington).
- 7) NAS/NRC (1972). National Academy of Sciences/National Research Council. The Effects on Populations of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR III (National Academy Press, Washington).

- 8) NAS/NRC (1980). National Academy of Sciences/National Research Council. The Effects on Population of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR III (National Academy Press, Washington).
- 9) NAS/NRC (1990). National Academy of Sciences/National Research Council. Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR V (National Academy Press, Washington).
- 10) NCRP (1954). National Council on Radiation Protection and Measurements, Permissible Dose from External Sources of Ionizing Radiation, NCRP Report No.17, National Bureau of Standards Handbook 59 (out of print)
- 11) NCRP (1987). National Council on Radiation Protection and Measurements. Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States NCRP Report No.93 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- 12) NCRP (1989). National Council on Radiation Protection and Measurements. Guidance on Radiation Received in Space Activities, NCRP No.98 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- 13) NCRP (1993) National Council on Radiation Protection and Measurements. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation, NCRP Report No.116 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- 14) NSC (1988). National Safety Council. Accident Facts (National Safety Council, Itasca, Illinois).
- 15) NCS (1995). National Safety Council. Accident Facts (National Safety Council, Itasca, Illinois).
- 16) ROBBINS, D.E. (1996). The space radiation environment pages 5 to 32 in Acceptability of Risk from Radiation-Application to Human Space Flight, NCRP Symposium Proceedings No.3 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- 17) SINCLAIR, W.K. (1983) Radiation standards: Space hazards vs. terrestrial hazards, Adv. Space Res, 3, 151-159.
- 18) UNSCEAR (1972). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ionizing Radiation: Levels and Effects, Nos. E.72.1X17, E.72.1X.18 (United Nations Publications, New York).
- 19) UNSCEAR (1977). United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, No. E.77.1X1 (United Nations Publications, New York).
- 20) UNSCEAR (1988). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation, No.E.88.1X7 (United Nations Publications, New York).
- 21) UNSCEAR (1994). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Annes A. Epidemiological Studies of Radiation Carcinogenesis, No.E94.1X, 11 (United Nations Publications, New York).

## 宇宙放射線環境

### The Space Radiation Environment

Donald E. Robbins (USRA)

#### 概要

宇宙放射線には、銀河宇宙線(GCR)、捕捉帯放射線、および太陽からの放出粒子(SPE)という3つの一次放射線源がある。これらはすべてイオン、すなわち原子核で構成されている。そのエネルギー範囲は、数MeV $u^{-1}$ からGeV $u^{-1}$ ( $u$ は「原子質量単位」)にまで及んでいる。これらのイオンは、宇宙船壁材等と相互作用しながら砕け、エネルギーの高い中性子と低原子量のイオンを生成する。

低傾斜角軌道(28.5度)での標準的な宇宙船(例えばスペースシャトル)内部の吸収線量率は、高度と飛行傾斜(赤道と軌道の角度)によって、0.05から2mGy $d^{-1}$ の範囲になる。低軌道での放射線の線質係数は、捕捉帯放射線とGCRの相対的寄与により左右され、さらに線量率は軌道高度と傾斜角両方によって変化する。対応する等価線量率の範囲は、0.1から4 mSv  $d^{-1}$ の間になる。

ミール宇宙ステーションおよび国際宇宙ステーションで計画されているような傾斜角の大きい軌道では、造血器官(BFO)の等価線量率は1.5mSv  $d^{-1}$ まで高められる。従って1年間の飛行では、乗組員は0.55 Svの総線量を受けることになる。南大西洋異常(SAA)を通過する高い高度で測定した最大等価線量率は、10mSv  $h^{-1}$ であった。

惑星間宇宙飛行(例えば火星ミッション)では、GCRだけに起因する年間被ばく線量のレベルは、

太陽活動極大期で150mSv  $y^{-1}$ 、太陽活動極小期で580mSv  $y^{-1}$ である。1989年10月に連続して起こった大きなSPEは、太陽活動極大期の前後数年で発生する可能性が高くなる。自由空間では、乗組員の被ばくを最小限にするため警告システムと安全避難所が運用手続きで効率的に使用できるものと仮定しても、このような現象はさらに別の300 mSvをもたらすこともある。従って、火星までの3年の飛行における総線量は、2Svを超える。1989年の太陽粒子放出中で最大の自由空間等価線量率は、10g  $cm^{-2}$ の遮蔽の下で40mSv  $h^{-1}$ と推定されている。

一般的に、宇宙飛行中における放射線被ばくは高線量領域、すなわち年間0.1Sv以上の領域になるが、適切な被ばく管理を行えば0.1Sv  $h^{-1}$ 以上の高線量率領域よりは低く抑えられる。

#### 序文

この論文は、宇宙放射線環境における物理学について詳細に検討することが目的ではない。むしろ、放射線生物学やリスクの専門家がアメリカ宇宙飛行士に対して被ばく限度を勧告できるように、各種の宇宙放射線について記述することを目的としている。最新の宇宙放射線環境に関する総合的な論評は1988年に書かれており(Benton and Panell, 1988)、その著者らは、それほど総合的ではないが、いくつかの論評も書いている(Rob-

bins et al., 1997, Robbins and Yang, 1994, Nicogossian and Robbins, 1994)。宇宙放射線に関する節を設けている「放射線防護と測定に関する米国放射線防護測定審議会(NCRP)の調査報告 No.98(NCRP, 1989)」の改訂版も作成中である。

宇宙放射線には、銀河宇宙線(GCR), 捕捉帯放射線, および太陽粒子放出(SPE)という3つの一次放射線源がある。宇宙放射線は、基本的にはイオンすなわち原子核である。二次放射線は、一次粒子と宇宙船の材料や大気構成物質との間の核相互作用によって生成される。この二次放射線は主にイオンと中性子から構成される。

宇宙飛行中、飛行士が被る宇宙放射線によるリスクは、2つの確率、すなわち、宇宙飛行士が特定の被ばく線量を受ける確率、およびこの被ばくが有害な影響をもたらす確率(短期または長期)の積として数学的に表現することができる。本文では、上記2つの確率のうち最初のタイプを取り扱う。一般的に予想被ばく線量の確率分布を決定することは実際的ではない。したがって、宇宙物理学者は、その不確かさの評価と同時に放射線被ばく線量の“最善予測値”を計算する。

### 銀河宇宙線

銀河宇宙線は、太陽系の外部で発生する高エネルギーのイオンで構成されている。その線束は等方的であり、太陽周期中の惑星間磁場の変化により変動を受ける。生物学的に最も問題視されているイオンのエネルギー範囲は、 $1,000 \text{ MeV u}^{-1}$ 以下である。(MeV  $\text{u}^{-1}$ は、単位原子質量あたりエネルギーのSI単位で、この場合  $\text{u}$  は原子質量単位を表し、MeVは100万電子ボルトを表す。従って、 $\text{u}$  が約1で、エネルギーが $100 \text{ MeV u}^{-1}$ の陽子は、 $100 \text{ MeV}$ の総運動エネルギーを持っていることになり、同じ条件下では $\text{u}$  が約4の $100 \text{ MeV}$ ヘリウムイオンは $400 \text{ MeV}$ の総運動エネルギーを持っていることになる。)低エネルギーイオンの線束は、1太陽周期内で10倍程度変化する。高エネルギー( $>10 \text{ GeV u}^{-1}$ )では、太陽周期に伴う変動は20パーセント以下である。地球近くのGCR線束は、太陽活動に伴う地球周囲の磁場変化により変動し、太陽黒点数(太陽活動の一般的な尺度)に逆比例す

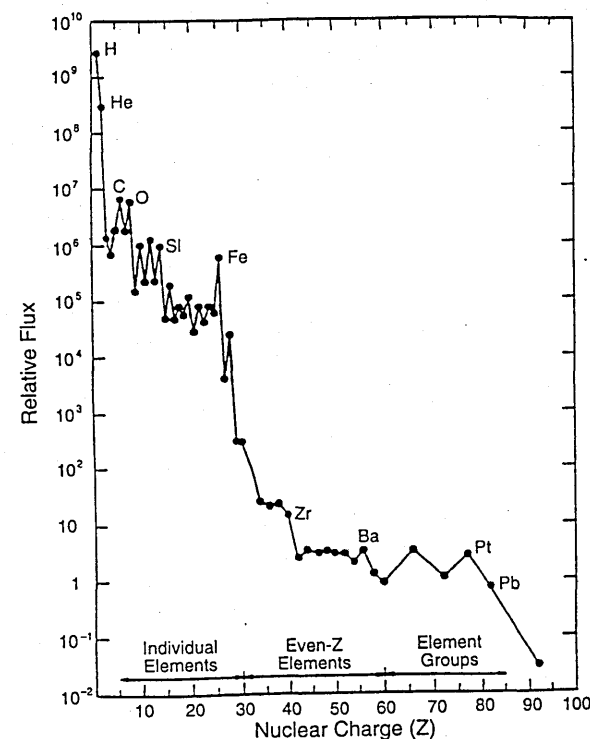


図1 原子番号の関数で示したGCRイオンの相対線束(Mewaldt, 1988)。シリコン(Si)の線束を106と想定した場合の相対値。

る。すなわち、その線束は、太陽活動極小期中に最も高くなる。

GCR線束は、地球の強い磁場により部分的に偏向されるため、地球の地磁気圏内で減少する。図1(Mewaldt, 1988)は、太陽活動極小期近くでの一次GCRの“自由空間”相対存在量を示している。“自由空間”とは、地球の磁場外の状態、すなわち、惑星間空間の状態をいう。)一次GCRイオンは完全に電離されている。このうち、生体を受ける線量に最も寄与すると考えられるイオンは、 $^1_1\text{H}$ ,  $^2_2\text{He}$ ,  $^{12}_6\text{C}$ ,  $^{16}_8\text{O}$ ,  $^{28}_{14}\text{Si}$ , および $^{56}_{26}\text{Fe}$ である。

異常宇宙線(ACR)は、中性原子が太陽紫外線で電離され、その後太陽系宇宙空間の衝撃波で加速されるときに発生する。ACRは、単独で電離された、主にHe, C, N, O, Ne, およびArイオンから組成されている。これらの量は、太陽活動で変動を受け、太陽活動極小期に観測しやすくなる。そのエネルギーは、一般に $100 \text{ MeV u}^{-1}$ 以下である。太陽からの1天文単位の距離では、総GCR線量に寄与する量は無視できる。総 GCR-He線束

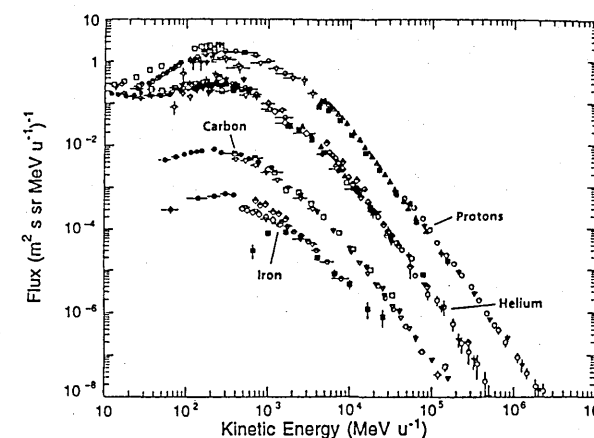


図2 運動エネルギーの関数で示したGCR中主要イオンのエネルギースペクトル(Simpson, 1983)。

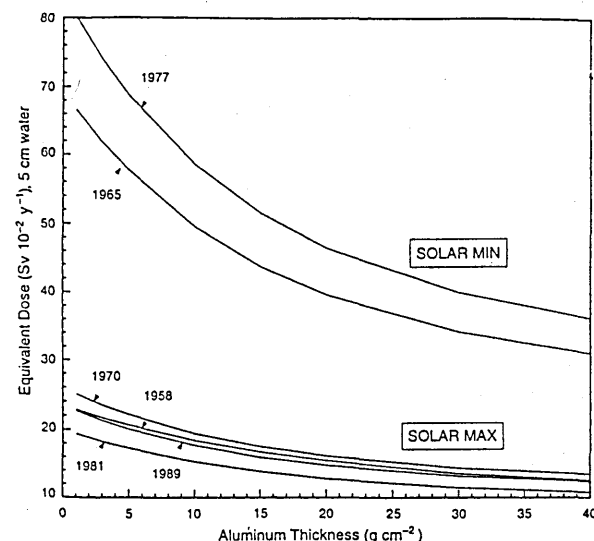


図3 太陽活動極小期と太陽活動極大期におけるGCR等価線量率低減にかかる遮蔽の効率(Badhwaj et al., 1994)。日付は、太陽活動極小期と太陽活動極大期の時点を示す。

の約5パーセントが $10 \text{ MeV u}^{-1}$ 以上のACRで、 $100 \text{ MeV u}^{-1}$ 以上のACR-He線束は1パーセント以下である。

図2(Simpson, 1983)は、より多量の一次GCR成分のエネルギースペクトルを示している。エネルギーが $1 \text{ GeV u}^{-1}$ 以上のイオンは1メートルの水を透過することができ、原子核の相互作用間では約 $10 \text{ g cm}^{-2}$ の平均自由行程を持っていることを理解しておく必要がある。

図3(Badhwaj et al, 1994)は、“自由空間”

GCR線量率を低減するための遮蔽の効果を図示している。計算された水中 $5 \text{ cm}$ 深さでの線量当量率は、太陽活動周期内のいくつかの時期についてアルミシールド厚みの関数として示してある。結果は、1958, 1970, 1981 および 1989年の太陽活

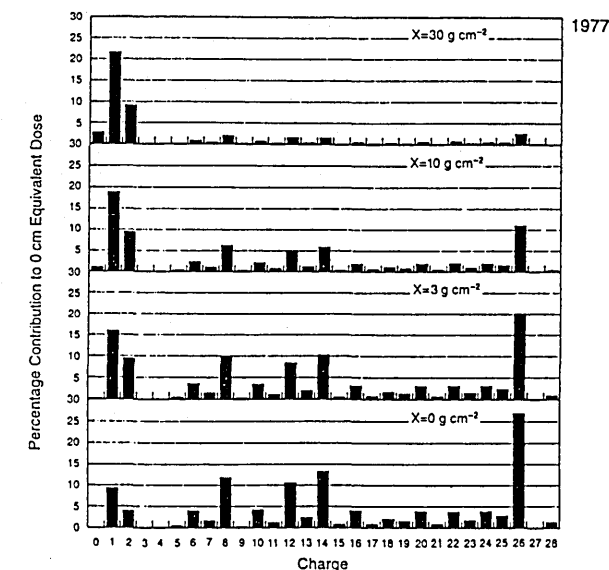


図4 1977年太陽活動極小期時、0, 3, 10および $30 \text{ g cm}^{-2}$ の遮蔽下における、GCRイオンが $0 \text{ cm}$ (皮膚)等価線量にもたらす原子番号別寄与の割合。

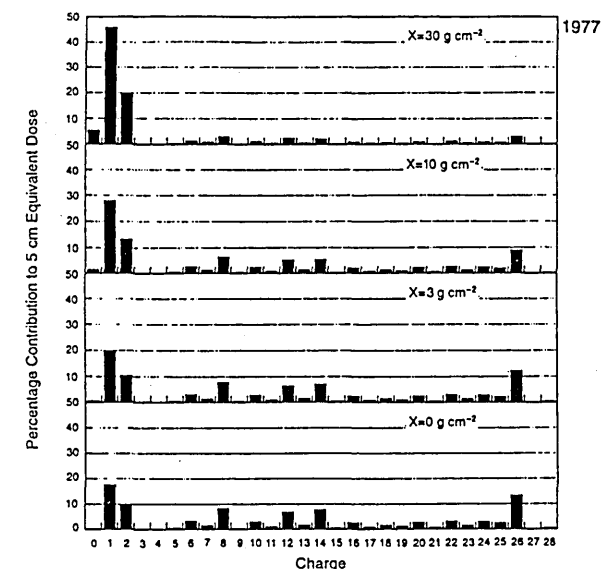


図5 1977年太陽活動極小期時、1, 3, 10および $30 \text{ g cm}^{-2}$ の遮蔽下における、GCRイオンが $5 \text{ cm}$ (BFO)等価線量にもたらす原子番号寄与の割合。

動極大期、および1965と1977年の太陽活動極小期に対して示してある。太陽活動極小期と太陽活動極大期間の差は、約3倍となる。1977年の太陽活動極小期は、これまで観測されたうちで最も高い線量率となった。また、1989年の太陽活動極大期は最も低い値が観測された。20g cm<sup>-2</sup>のシールド厚みにより、等価線量率が約40パーセント減少し、さらに20g cm<sup>-2</sup>を追加すると約15パーセントが減少する。最近、過去4回の太陽周期中に取得されたGCR線束測定と約10パーセント以内で一致するモデルが開発された(Badhwar と O'Neill, 1992; 1996)。このモデルでは、将来の太陽活動の予測評価値として中性子線量率と太陽黒点数を採用している。

図4は、1977年の太陽活動極小期で、シールド厚みが0, 3, 10および30g cm<sup>-2</sup>の場合に電荷28(28Ni)以下と非電荷(中性子)のGCR粒子が0cm(皮膚)等価線量に寄与する割合を示している。

図5は、1977年の太陽活動極小期で、シールド厚みが1, 3, 10および30g cm<sup>-2</sup>の場合に5cm造血器官(BFO)等価線量へのGCRイオンの影響をパーセントで示している。シールドの厚みが薄いと、大きな影響は電荷<sub>1</sub>H, <sub>2</sub>He, <sub>8</sub>O, <sub>12</sub>C, <sub>14</sub>Nおよび<sub>26</sub>Feが与えシールドが厚くなると、大きな電荷イオンは破碎される。従って、中性子、陽子および

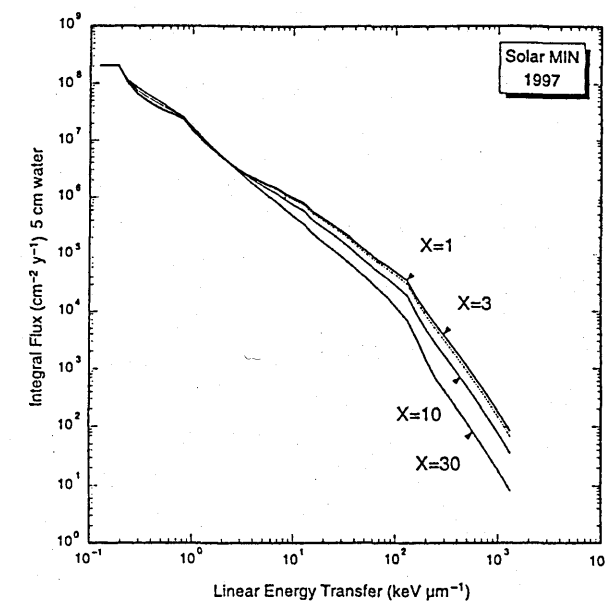


図6 1977年太陽活動極小期時、1, 3, 10および30gcm<sup>-2</sup>の遮蔽下におけるGCRのLETスペクトル。

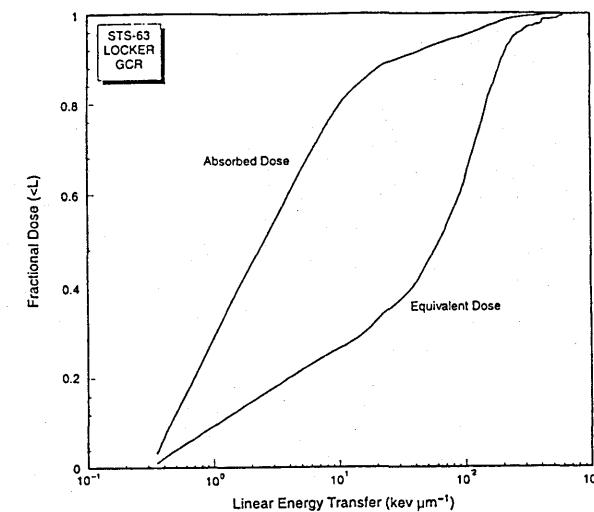


図7 LETの関数で表した、GCR寄与の吸収線量と等価線量の相対度数(Badhwar et al., 1996a)。

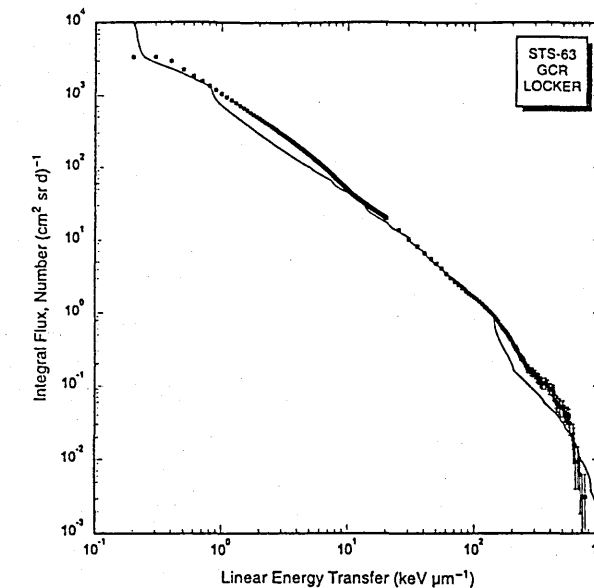


図8 STS-63の高傾斜角軌道のスペースシャトル中間デッキロッカー上で、TEPCを使って測定したGCRのLETスペクトル (Badhwar et al., 1996a)

Heが線量に最も寄与する。

図6は、1977年の太陽活動極小期で、シールド厚みが1, 3, 10および30 gcm<sup>-2</sup>の場合に自由空間GCRのLETスペクトルの変化を示している。約5 gcm<sup>-2</sup>以上のシールドでは、かなりの低下が認められる。この低下は、このシールド厚で原子核の相互作用が重要になるためである。

図7は、組織等価比例計数管(この論文では頭字

語TEPCで示す)を使ってSTS-63(傾斜角51.6度、高度400km)中にスペースシャトルのペイロード搭載室で行った測定に対して、LETの関数としてのGCRからの微分線量と等価線量を示している(Badhwar他 1992年)。吸収線量の90パーセントは、LETが30keV μm<sup>-1</sup>以下の放射線等、価線量の90パーセントは、LETが300keV μm<sup>-1</sup>以下の放射線によるものである。

図8 (Badhwar et al., 1996a)は、STS-63上のスペースシャトルロッカー内部で測定されたGCR LETスペクトルを示している。なだらかな曲線は、NASAラングレー研究センター(Langley Research Center)HZETRN輸送コードを使ってモデル計算から求めている(Wilson et al., 1995)。

GCRの自由空間線質係数は約4.6であるが、アメリカ/ロシアMir-18飛行(1995年3月2日から6月18日まで)中に行われたTEPCによる測定から計算されたGCRの線質係数は3.2であった。GCR線束の一部は、地球の磁場と地球の影により低地球軌道から偏向される。2.9の値は、初期の作業のものと思われる(NCRP, 1989)。その差は、二次粒子からの影響を含めなかった初期の輸送コードの誤差によるものと考えられる。過去5年間、輸送コードにかなりの改良が行われている。

図9 (Badhwar et al., 1995a)は、宇宙飛行で被ばくを計算する際に使用する不確かさの推定を示している。この図は最近の太陽周期の後半に行っ

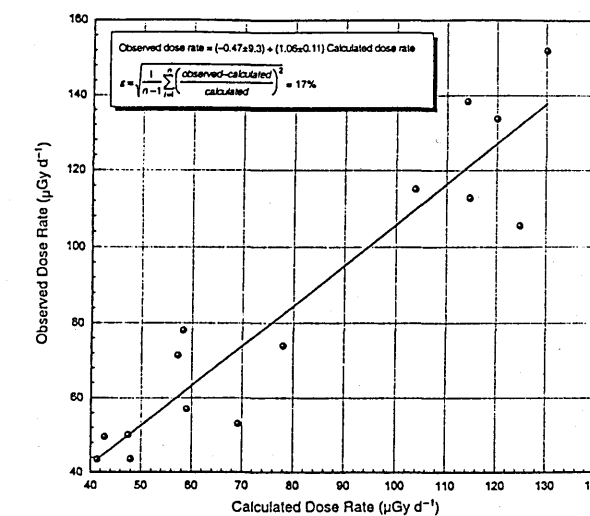


図9 GCR計算における不確かさ。RMS(平方平均)の差は平均17%(Badhwar et al., 1995a)。

た15回のスペースシャトル飛行から得た、観測された線量率と計算された線量率の関係を示している。直線は最小自乗近似である。平方平均偏差値(RMS)の差は、約17パーセントである。測定した線量率の不確かさは、全体の5パーセントに及ぶと考えられている。すなわち、GCR線量率の推定では、総計で20パーセント以下の不確かさが伴うことを示している。

### 捕捉帯放射線

捕捉帯の物理については、ここでは解説しない。外帯電子についても、有人宇宙飛行ではほとんど

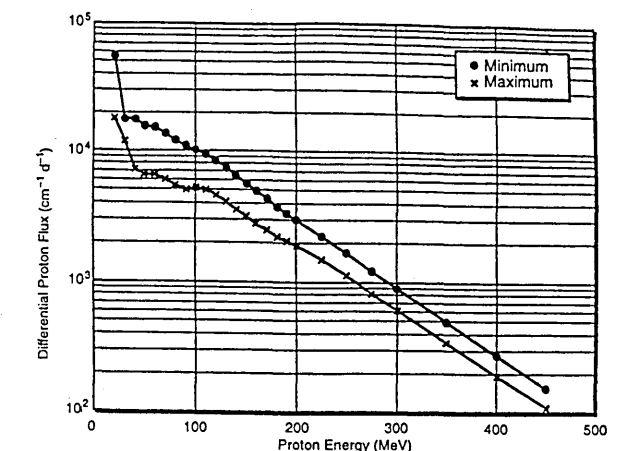


図10 太陽活動極小期と太陽活動極大期に対してAP-8モデルから求めた最高高度(470km)の国際宇宙ステーションにおける捕捉帯放射線の陽子スペクトル。

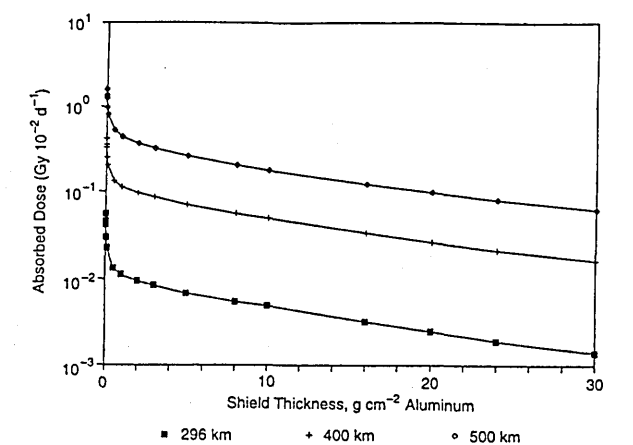


図11 高度296, 400および500kmの低い傾斜角(28.5)軌道での吸収線量率低減にかかる遮蔽の効果。



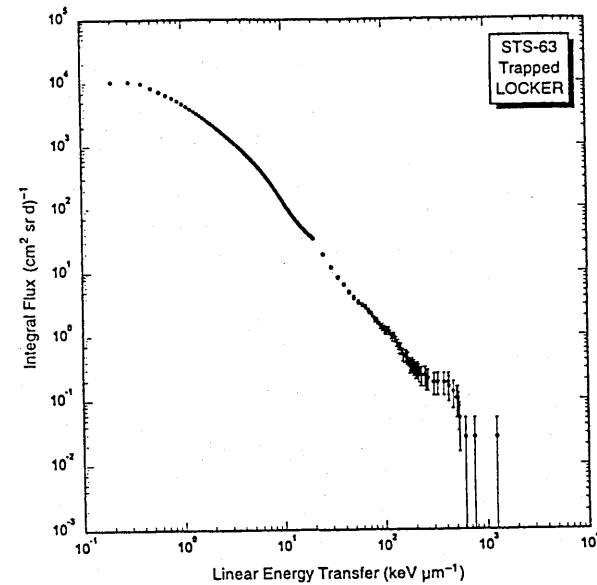


図12 STS-63にてスペースシャトルの中間デッキ内で測定された捕捉帯放射線のLETスペクトル。

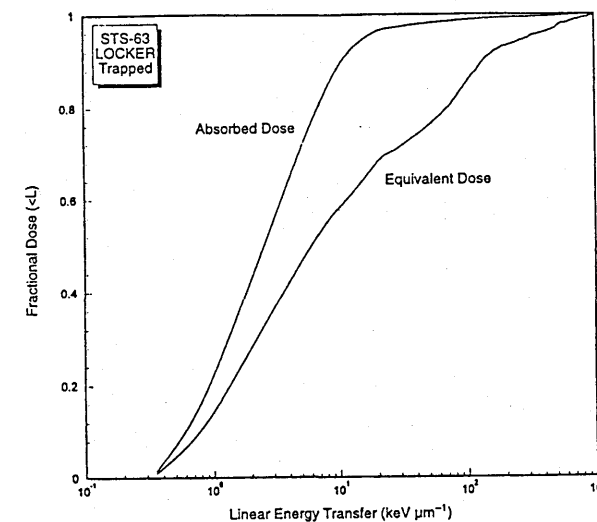


図13 LETの関数で表した、捕捉帯放射線寄与の吸収線量と等価線量の相対度数。

危険にはならないので、説明を省く。外帯電子は、惑星間宇宙飛行でその中を通過する場合にわずかながら線量に寄与する。一方、内帯は低地球軌道飛行において主要な放射線被ばく源になっている。

内帯は主として陽子からなっているが、その他のイオンによる小さな線束も観測されている。しかしこれらのイオンは、乗組員の被ばくにはそれほど影響を与えない。図10は、傾斜角51.6度、高

度470kmの軌道での太陽活動極小期と太陽活動極大期時のAP-8モデル(Sawyer and Vette, 1976)から求めた陽子スペクトルを示している。(国際宇宙ステーションの傾斜角は51.6度で、高度は370kmから470kmである。)

図11は、低い傾斜角(28.5度)軌道で捕捉帯放射線から受ける吸収線量を低減する際に使用する遮へいの有効性を示している。データは、3つの高度すなわち 296, 400および500kmに対して示してある。陽子スペクトルは非常に高エネルギーに及ぶため、約1g cm⁻²以上のシールド厚では、線量の大幅な低減はできない。

図12(Badwar et al., 1995a)は、STS-63のスペースシャトル中間デッキ内のTEPCで測定したトラップ陽子のLETスペクトルを示している。

図13は、STS-63中にスペースシャトル中間デッキ内で測定した捕捉帯放射線から得た吸収線量と等価線量の累積分布をLETの関数として表している。吸収線量の80パーセントは、LETが10 keV μm⁻¹以下の放射線、等価線量の80パーセントはLETが120 keV μm⁻¹以下の放射線によるものである。

捕捉帯放射線の平均線質係数は、Mir-18飛行中に得られたTEPC測定から1.9と計算される。NCRP(1989)は、「南大西洋異常で遭遇した陽子と派生物」に1.3の値を使用した。捕捉帯モデルの不確かさは、おそらくこの差によるものである。AP-8モデルは、1958年から1970年までにわたって23の衛星で得られた測定値を使って作られた。

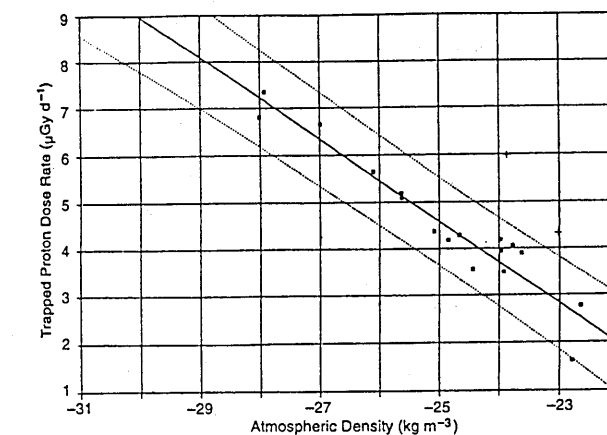


図14 大気密度の関数で表した捕捉帯放射線線量率(Golightly et al., 1996)。実線は最小自乗適合を示し、点線は90パーセント信頼限界を示す。

このモデルの不確かさは、2倍と評価されている。しかし、数多くの有人宇宙飛行で行われた線量測定結果に基づいて、ミッション計画者は、飛行中の累積被ばく線量を25から30パーセント以内の誤差で推定できるとしてこのモデルの使い方を学んだ。このモデルの最大誤差要因は、捕捉帯線束における異方性(例、東と西の非対称)を説明しないことである。長期被ばく実験設備(LDEF)で行った測定によると、後縁で発生する線量は前縁のものよりも1.7から2.5倍大きくになっている(Armstrong et al., 1990, Harmon et al., 1992)。

捕捉帯陽子線束における太陽活動が引き起こす変動は、それを大気密度に関連させることによって規格化することができる(Pfitzer, 1990)。図14(Golightly et al., 1996)は、線量率対大気密度の“対数-対数”プロットを示している。実線は、傾斜角57度のスペースシャトル飛行で測定された値に対して適合したものである。点線は、90パー

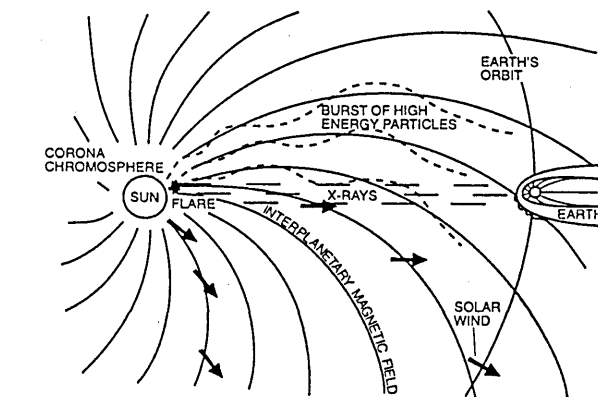


図15 太陽風によって決定される惑星間空間での太陽の磁力線分布。太陽表面で加速された陽子は、磁束管に沿って、時には地球の周辺に到達する(Smart, 1988)。

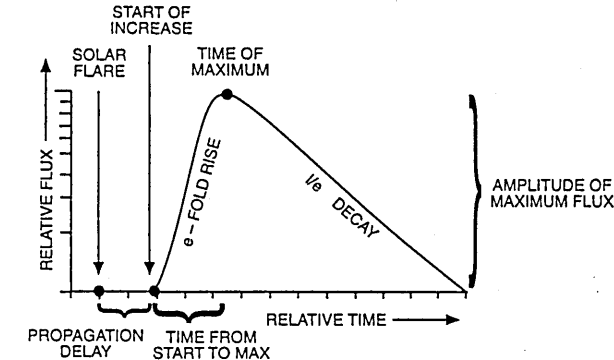


図16 SPE線束の一般的な時間変動特性(Smart, 1988)。

セント信頼限界を示す。

## 太陽粒子発生

太陽粒子発生(SPE)は、惑星間宇宙飛行(例、月や火星へのミッション)ではかなりの脅威になる。ミール宇宙ステーションと国際宇宙ステーションのような、傾斜角の大きい軌道の宇宙飛行では、SPEによる放射線を受けることもある。

SPEはほとんどが陽子から構成されている。しかし一部のSPEでは、Heイオンが10パーセント寄与しているケースも観測されている。SPEの起こる時間や大きさは予測できない。しかし、累積線量が重大なレベルになる前に、宇宙飛行士を数時間“安全な場所”に避難させるための警告システムを考案することは可能と思われる。

SPEは太陽活動極大期の年に頻発する太陽フレアを示す多くの兆候のうちの1つにすぎない。図15(Smart, 1988)は、関連する太陽フレア時に加速される太陽表面の地域から発生する高エネルギー陽子の伝播を示している。可視光線、X線および電波放射線のような電磁放射線は太陽から地球まで8分かかって直線で走行し、荷電粒子は図に示すようならせん形状で太陽から発散する惑星間磁力線に沿って伝播する。さらに、大量の粒子が光速以下で走行する。従って、陽子が太陽表面から地球まで伝わるにはかなりの長時間が必要になる。陽子が宇宙に向かって外に移動する時その旋回中

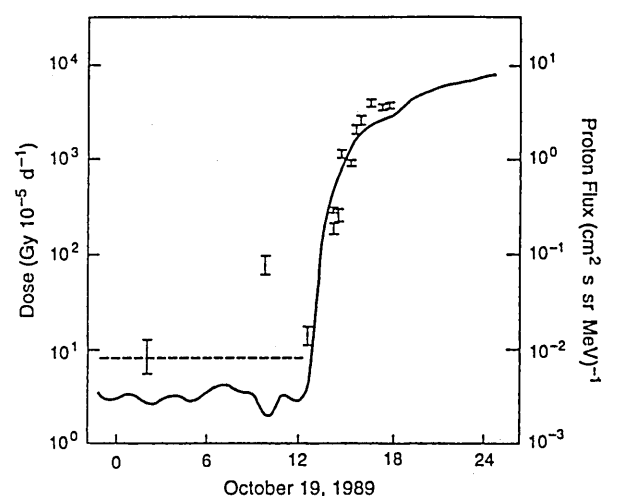


図17 1989年10月のSPE発生時、ロシアの電離箱(実線)とNOAA GOES衛星スペクトロメータによる陽子線の測定値(Lobakov et al., 1992)。

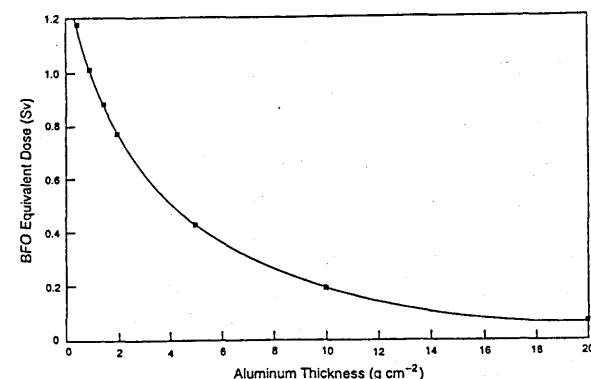


図18 1989年10月のSPEに対する、BFO等価線量削減にかかる遮蔽の効果(Simons et al., 1991)。

心となる惑星間磁束管(magnetic field tube)が、地球から陽子を頻りに運び出す。

太陽フレアの位置および惑星間磁束管の位置が陽子を地球の領域に伝搬できるような場合には、陽子線束の時間分布は図16に示すような特性を示す(Smart, 1988)。伝搬遅延時間、すなわち、太陽表面上での太陽フレアの発生から陽子線束が上昇を開始するまでの時間は、通常数時間である。陽子線束がピークに達するまでには、さらに数時間が必要である。大きなSPEでは、ピークから衰退する間は、陽子線束が数日間にわたって指数関数的に減少する。

従って、SPEからの放射線被ばくを受ける確率は高く、運用手順によって管理する必要がある。惑星間飛行に運用手順が採用されない場合、乗組員らはSPEから非常に高い被ばくを受けることになる。1989年10月19日から27日に発生したSPE群は、過去50年に発生した惑星間放射線環境のうち最も過酷な状態のひとつである。

図17(Lobakov et al., 1992)は、ロシアの電離箱を使ってミール宇宙ステーション内部で測定した低地球軌道での線量率(実線)とGOES-7 NOAA衛星上で測定した39から82 MeVの線束(かっこ)を示している。線量率は、4時間で $3 \times 10^{-5}$ から $3 \times 10^{-2}$  Gy d<sup>-1</sup>まで1,000倍増加している。この4時間の間に、ミール宇宙ステーション内での累積被ばく線量は約 $2.5 \times 10^{-3}$  Gyであった。ただし、適切な警告を行えば、宇宙飛行士は安全な場所に避難してこの過酷な環境からの被ばくを減らすことができる。(宇宙船内でSPE放射線が

測定できるのは、高度の高い軌道にいる間だけであることを理解するべきである。自由空間内における被ばく線量は、はるかに高かったと思われる。)図18(Simonsen et al., 1991)は、1989年10月19日から27日までのSPE期間にわたって積分された自由空間でのBFO等価線量をアルミシールド厚の関数として示している。1g cm<sup>-2</sup>のシールドの陰になったBFOに対する被ばく線量は約1Svに減少し、10g cm<sup>-2</sup>の陰での被ばく線量は約0.2 Svに減少している。SPEのかなりの部分は20 gcm<sup>-2</sup>のシールドがある安全な避難所で過ごすことで避けることができ、被ばく線量は0.1Sv台まで低減することができる。10g cm<sup>-2</sup>の陰での最大皮膚線量率は0.04Sv h<sup>-1</sup>になると推定されている。

## 二次中性子

有人宇宙飛行中における中性子の測定は数回行われた(Badhwar et al., 1996c)。エネルギーが1~15MeVの中性子は、高度290kmでは $5.3 \times 10^{-5}$  Sv d<sup>-1</sup>の等価線量率となり、高度462kmでは $1.7 \times 10^{-4}$  Sv d<sup>-1</sup>となる。Benton and Parnell (1988)は、1MeVエネルギー以下の中性子の等価線量率が約 $2.2 \times 10^{-5}$  Sv d<sup>-1</sup>になるものと推定している。モデル計算(Armstrong and Colbom, 1992; Keith et al., 1992)によると、このエネルギー範囲は総中性子等価線量の約半分しか寄与しないことを示唆している。従って、総中性子等価線量率の寄与は、高度462kmでは $4.0 \times 10^{-4}$  Sv d<sup>-1</sup>にもなり得る。

## 標準的な宇宙飛行における被ばく線量

### 1. 傾斜角の低いスペースシャトル飛行

現在までに、低傾斜角での飛行中に捕捉帯内で測定された最大線量率は、594kmの高度、傾斜角28.5度で飛行したSTS-61で測定されたものであった。図19(Badhwar et al., 1996b)はTEPCの測定を示している。南大西洋異常(SAA)を通過する時のピーク線量率は約 $1.0 \times 10^{-4}$  Gy min<sup>-1</sup>であった。1日6回地球を周回するスペースシャトルのSAAを通過する標準通過時間は約15分であった。したがって、最大線量率は0.1Sv h<sup>-1</sup>以上の“高線量率”領域より大幅に低くなる。

図20は、低傾斜角(28.5度)のスペースシャトル

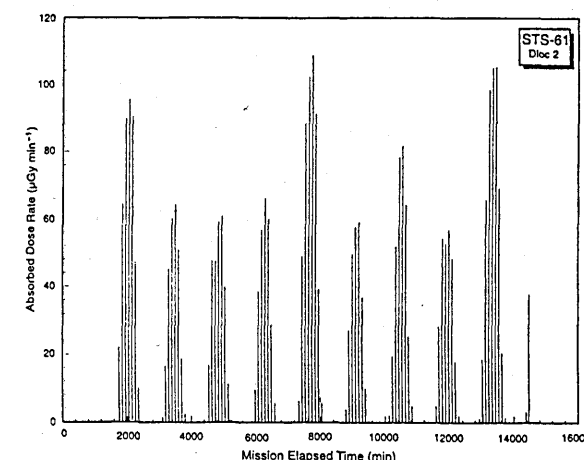


図19 STS-61の低傾斜角(28.5度)軌道において捕捉帯のSAAを通過中にスペースシャトルの中間デッキ内で測定された吸収線量率(Badhwar et al., 1996b)。

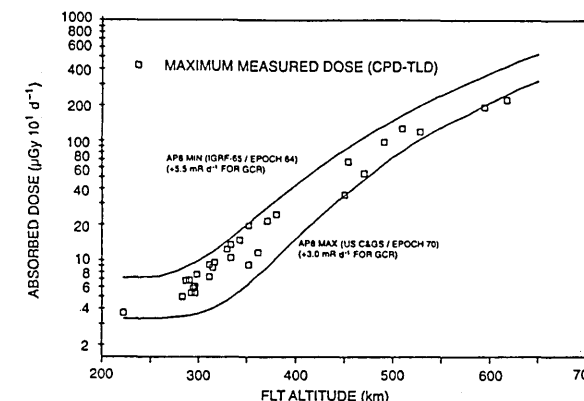


図20 高度の関数で表したスペースシャトル飛行の低傾斜角軌道時に測定された乗組員の最大吸収線量率。実線は、太陽活動極大期と太陽活動極小期のAP-8モデルを使った計算から求めたもの(Hardy, A.C. 1996 private communication)。

飛行で熱ルミネセンス線量計(TLD)を使って測定された乗組員の最大被ばく線量率を、高度の関数として示している。吸収線量率は、 $5 \times 10^{-5}$  Gy d<sup>-1</sup>から $2 \times 10^{-3}$  Gy d<sup>-1</sup>の範囲になっている。平均線質係数は約1.8であった。従って、等価線量率は、 $1 \times 10^{-4}$  Sv d<sup>-1</sup>から $4 \times 10^{-3}$  Sv d<sup>-1</sup>の間であった。TLDは乗組員の衣服の上に装着するので、これらの被ばく線量は皮膚に対する線量に対応する。

### 2. 高傾斜角スペースシャトル飛行

図21は、高傾斜角(49.5から61度)のスペースシャトル飛行中にTLDで測定された最大乗組員被

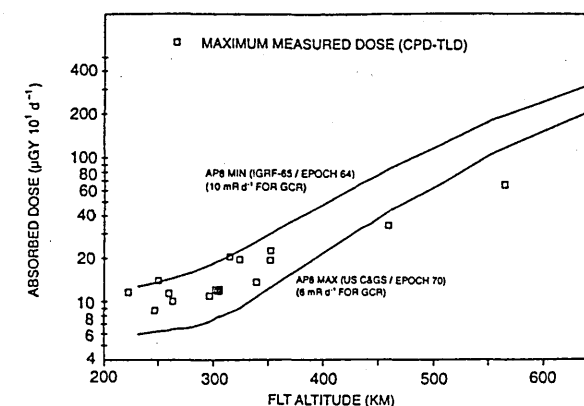


図21 高度の関数としてスペースシャトル飛行の高傾斜角軌道中で測定された乗組員の最大吸収線量率。実線は、太陽活動極大期と太陽活動極小期のAP-8モデルを使った計算から求めたもの(Hardy, A.C. 1996 private communication)。

ばく線量を高度の関数として示している。高傾斜角飛行では、低傾斜角飛行の時と比べて高い高度では飛んでいない。高傾斜角飛行で測定された最大線量率はSTS-27での約 $6 \times 10^{-4}$  Gy d<sup>-1</sup>であった。

すでに説明したとおり、高い傾斜角の軌道ではSPEによる被ばくを受けることがある。1992年10月19-27日のSPE中にミール宇宙ステーションでロシア人が行った測定によると、数mSvの累積線量が得られている。ミール軌道を通る実際の放射線量は、太陽と地球間の惑星間磁場の構造によって左右されるため、予測することは非常に困難である。高傾斜角軌道で重大なSPE被ばく線量を浴びるには、その衝撃面が地球の磁気圏を著しく圧縮するような磁気あらしが同時に発生する必要があると思われる。

高傾斜角飛行が高線量率の危険を意味するのでないことは明らかである。

### 3. ミール宇宙ステーションでの飛行

図22は、115日間Mir-18飛行中にTEPCを用いて得られたコアモジュール内部の集積(GCRおよび捕捉帯陽子)LETスペクトルを示している。プラスチック飛跡検出器(PNTD)の結果は比較のため示してある。PNTDの感度は低いLETでは低下する。

図23は、相対高度依存関係を求めるためAP-8

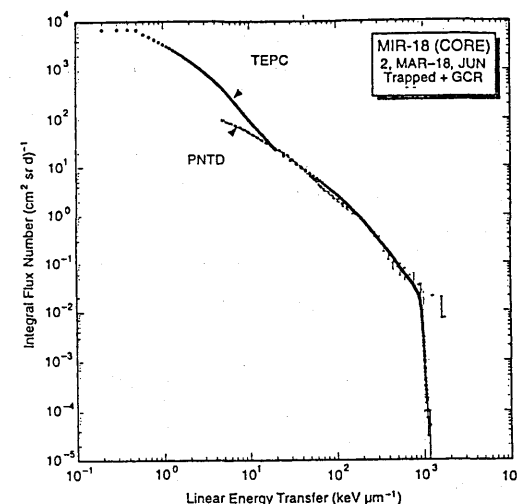


図22 115日間のMir-18飛行中に測定された積分(GCRと捕捉帯)LETスペクトル。TEPCとPNTDの測定結果が比較されている。

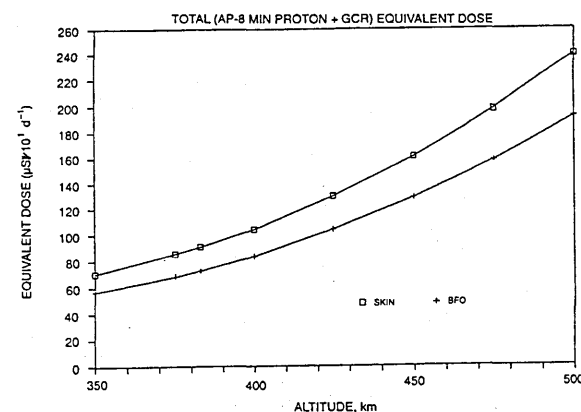


図23 ミール乗組員の線量当量率と高度との関係。AP-8捕捉帯モデルを使って計算し、高度400kmのMir-18飛行中に得られた測定値に対して規格化された皮膚線量率とBFO線量率。

捕捉帯モデルを使って、高度の関数として皮膚線量率とBFO等価線量率をミール宇宙ステーション内で計算し結果を示している。モデルデータの不確かさは、計算を400km高度のMir-18飛行で行った測定値で規格化することにより最小にされている。国際宇宙ステーション(470km)の最大高度においては、BFO等価線量率は約 $1.5 \times 10^{-3}$  Sv  $d^{-1}$ である。1年間の飛行では、宇宙飛行士は0.55 Svの総BFO等価線量を受けることになろう。数人のロシア人宇宙飛行士は現実に1年以上ミール宇宙ステーション内で過ごしている。

ICRP(1977)のLETに基づいた評価方法とMir-

18でのTEPCによる測定値を使って、2.7の平均線質係数が計算されている。

ミール宇宙ステーション内の6カ所で行ったTLD測定では、 $3.1 \times 10^{-4}$ から $5.9 \times 10^{-4}$  Gy  $d^{-1}$ までの範囲の吸収線量が得られている。この値の範囲は、いろいろな場所での異なったシールドの効果を示している。2.7の平均線質係数を使うと、等価線量率は $8.4 \times 10^{-4}$ から $1.6 \times 10^{-3}$  Sv  $d^{-1}$ の範囲になる。115日間の飛行では、これらの場所での総被ばく線量は0.096から0.18 Svの範囲になった。上記の値は露出した線量計による測定であったので、皮膚線量に密接に対応する。(高LETでは感度が低下するが、TLDの線量は20%誤差の補正はされていない)。Mir-18飛行のさらに厚いシールドのコアキャビン内でTEPCで測定した吸収線量と等価線量率は、それぞれ $3.0 \times 10^{-4}$  Gy  $d^{-1}$ と $7.8 \times 10^{-4}$  Sv  $d^{-1}$ であった。

ミール宇宙ステーションへの飛行は高い線量率の危険を意味しないが、60から100日間の飛行では高線量領域で被ばくすることもあり得る。

#### 4. 国際宇宙ステーションでの飛行

各種モジュール内の位置における最終的なシールド率が分からないため、国際宇宙ステーション乗組員の被ばく線量を正確に予測することは不可能である。多くの場合、ラックに取付けられた装置および積込まれた補給品により大規模なシールドが形成される。NASAジョンソン宇宙センターの宇宙放射線グループによる宇宙ステーション被ばく線量に関する最新の推定を表1に示す。宇宙ステーションは太陽活動極小期に近づく低い高度で飛行して、被ばく線量を少なくできる。太陽活動極大期が近づく、抗力(drag)が大きくなるので、高い高度で長時間を過ごすことができる。

国際宇宙ステーションを建設、維持するための

表1 国際宇宙ステーション内での予想BFO線量レベル

高度	太陽活動極小期 太陽活動極大期	
	370km (Sv/月)	500km (Sv/月)
終節部	$8 \times 10^{-3}$	0.023
居住部	$6 \times 10^{-3}$	0.017

宇宙船外活動(EVA)は広範囲にわたることに注意しなければならない。ジェミニや、アポロ、スカイラブ、スペースシャトル計画の累積EVA時間は約50時間に及ぶ。国際宇宙ステーションを建設するための総EVA時間は、400時間にも達する。もちろん、この時間は20人以上の宇宙飛行士が分担する作業である。EVA期間中の被ばくを少なくするため、EVA活動中はSAAを通過しないように規制する飛行規則がある。

EVA被ばく線量の推定が困難なもう一つの要因は、その活動が行われる場所についての知識、すなわち、単なる地理的な場所ではなく、宇宙飛行士が異方性捕捉帯線束からどの程度防護されるかについての知識である。宇宙飛行士が宇宙服によるわずかに $1g \text{ cm}^{-2}$ のシールドで保護される場合、被ばく線量は宇宙ステーション内の比較的薄くシールドされた場所よりも大幅に大きくなることはない。EVA中の被ばく線量は、個別宇宙飛行士の職業的被ばく線量について慎重に規定している。運用上の手続きで管理するのが妥当であると思われる。

国際宇宙ステーション用に推定される線量率は高線量率領域のものではないが、5ヶ月以上にわたる飛行期間中の総被ばく線量は高線量に達することがある。

#### 5. 惑星間(月と火星)飛行

惑星間飛行では、GCRとSPEという2つの一次的放射線源にさらされる。被ばく線量は、飛行期間、実施時の太陽周期、シールドによる防護と運用手順の両方を定義した飛行関連の細目等によって大きく変化する。

惑星間宇宙船は、使用可能なシールド保護に関しては、これまでに飛行した有人宇宙船とは違っていないものと推定できる。平均シールド厚が $10 g \text{ cm}^{-2}$ の宇宙船を想定すると、GCRによる水中5 cm深さの等価線量率は、太陽活動極大期の0.15 Sv  $y^{-1}$ から太陽活動極小期の0.58 Sv  $y^{-1}$ の範囲になる。

同様に惑星間飛行のSPE被ばく線量は、有効な運用手順が採用されているものと仮定すると、一太陽粒子放出あたり0から0.3 Svにまで変化することもある。火星探査飛行では約3年の期間が

必要になる。従って、火星探査飛行での最大総被ばく線量は2 Svを超えることになる。

惑星間飛行中に発生するSPEは、宇宙飛行士を高線量率領域にさらす可能性がある。しかし運用手順が良好であれば警告装置が単純であっても、このような被ばくが避けられるよう、SPEの危険を削減できるはずである。

しかし現時点では、惑星間飛行での総被ばく線量を高線量領域未満に下げることが不可能であろうと思われる。この点に関連して、Dr. John Garlick(1996)が提示する論文に、運用手順に関する追加情報が発表されている。

#### 参考文献

- ARMSTRONG, T.W., COLBORN, B. L. and WATTS, J.W. (1990). Characteristics of Trapped Proton Anisotropy at Space Station Freedom Altitudes, Report ASIC- 90/1474 (Science Applications international Corporation, Prospect, Tennessee).
- ARMSTRONG, T.W. and COLBORN, B.L. (1992). "Predictions of induced radio activity for spacecraft in low Earth orbit," *Nuc. Tracks Radiat. Meas.* **20**, 101-130.
- BADHWAR, G.D. and O'NEILL, P.M. (1992). "An improved model of galactic cosmic radiation for space exploration mission," *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **20**, 403-410.
- BADHWAR, G.D. and O'NEILL, P.M. (1996). "Galactic cosmic radiation model and its applications," *Adv. Space Res.* **17**, 7-17.
- BADHWAR, G.D., KONRADI, A., HARDY, A.C. and BRABY, L.A. (1992). "Active dosimetry measurements on shuttle flights," *Nucl. Tracks* (1993) *Radiat. Meas.* **20**, 13-20.
- BADHWAR, G.D., CUCINOTTA, F.A. and O'NEILL, P.M. (1994). "An analysis of interplanetary space radiation exposures of various solar cycles," *Radiat. Res.* **138**, 201-208.
- BADHWAR, G.D., O'NEILL, P.M., CUCINOTTA, F.A. and WEYLAND, (1995a). "Space Shuttle measurements of the galactic cosmic radiation linear energy transfer spectra over a solar cycle



- and their comparison with radiation transport model," pages 1118 to 1121 in Proceedings of 24th International Cosmic Ray Conference 4 (International Union of Pure and Applied Physics, Winnipeg, Canada).
- BADHWAR, G.D., ATWELL, W., BENTON, E.V., FRANK, A.L., KEEGAN, R.P., DUDKIN, V.E., KARPOV, O.N., POTAPOV, Y.V., AKPOVA, A. B., MAGRADZE, N.V., MELKUMYAN, L.V. and RSHTUN, S.H.B. (1995b). "A study of the radiation environment on board the Space Shuttle Flight STS-57," *Radiat. Meas.* **24**, 283-289.
- BADHWAR, G.D., ATWELL, W., CASH, B., WEYLAND, M., PETROV, V.M., TCHERNYKH, I.V., AKATOV, Y.A., SHURSHAKOV, V. A., ARKHANGELSKY, V.V., KUSHIN, V.V., KLYACHIN, N.A., BENTON, E.V., FRANK, A. L., KEEGAN, R.P., DUDKIN, V.E., POPAPOV, Y.V., VANA, N., SCHONER, W. and FUGGER, M. (1996a). "Radiation measurements on STS-63," *Radiat. Meas.* **26**, 901-916.
- BADHWAR, G.D., PATEL, J.U., KONRADI, A., CUCINOTTA, F.A. and KERN, J.W. (1996b). "Tarped particle energy spectrum in shuttle mid-deck," *Adv. Space Res.* **18**, 149-157.
- BADHWAR, G.D., GOLIGHTLY, M.J., KONRADI, A., ATWELL, W., KERN, J.W., CASH, B., BENTON, E.V., FRANK, A.L., SANNER, D., KEEGAN, R.P., FRIGO, L.A., PETROV, V.M., TCHERNYKH, I.V., AKATOV, Y.A., SHURSHAKOV, V.A., ARKHANGELSKY, V.V., KUSHIN, V.V., KLYACHIN, N.A., N. and SCHONER, W. (1996c). "In-flight radiation measurements on STS-60," *Radiat. Meas.* **26**, 17-34.
- BENTON, E.V. and PARNELL, T.A. (1988). "Space radiation and dosimetry on U.S. and Soviet manned missions," pages 729 to 794 in Terrestrial Space Radiation and Its Biological Effects, McCormack, T., Swenberg, C.E. and Buck, H., Eds., NATO ASI Series A, Life Sciences Vol. 154 (Plenum Publishing Corporation, New York).
- GARRICK, J.B. (1996). "Analytic concepts for assessing risk as applied to human space flight," pages 73 to 85 in Acceptability of Risk from Radiation-Application to Human Space Flight, NCRP Symposium Proceedings No. 3 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- GOLIGHTLY, M.J., BADHWAR, G.D., DUNLOP, M.J., and PATEL, J.V. (1996). "Solar - cycle modulation of the trapped proton radiation exposure inside the Space Shuttle," pages 505 to 516 in Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances, Astronomical Society of the Pacific Conference Series 95, Balasubramaniam, K.S., Keil, S.L. and Smart, R.N., Eds. (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco).
- HARMON, B.A., FISHMAN, G.J., PARNELL, T. A., BENTON, E.V. and FRANK, A.L. (1992). "LDEF radiation measurements: Preliminary results," *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **20**, 131-136.
- ICRP (1977). International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26. Annals of the ICRP 1 (Pergamon Press, Elmstord, New York).
- KEITH, J.E., BADHWAR, G.D. and LINGSTROM, D.J. (1992). "Neutron spectrum and dose-equivalent in shuttle flights during solar maximum," *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **20**, 41-48.
- LOBAKOV, A.P., LYAGUSHIN, V.I., PANASYUK, M.I., PETROV, V.M. and SHAVERIN, P.I. (1992). "Long-term measurements of the neutron flux aboard the Mir-type Space Station," *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* **20**, 59-64.
- MEWALDT, R.A. (1988). "Elementary composition and energy spectra for galactic cosmic rays," pages 112 to 132 in Interplanetary Particle Environment, publication 88-28, Feynman, J. and Gabriel, S., Eds. (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California).
- NCRP (1989). National Council on Radiation Protection and Measurements. Guidance on Radiation Received in Space Activities, NCRP Report No. 98 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- NICOGLOSSIAN, A.E. and ROBBINS, D.E. (1994). "Characteristics of the space environment," pages 50 to 62 in Space Physiology and Medicine, third ed., Nicoglossian, A.E., Huntoon, C.L. and Pool, S.L., Eds. (Lea and Febiger, Philadelphia).
- PFITZER, K.A. (1990). Radiation Dose to Man and Hardware as a Function of Atmospheric Density in the 28.5° Space Station Orbit, Report No. H5387 rev. A (McDonnell Douglas Space Systems Company, Huntington Beach, California).
- ROBBINS, D., PETROV, V., SCHIMMERLING, W. and USHAKOV, I.B. (1997). "Risks to humans from ionizing space radiation," pages 365 to 398 in Humans in Spaceflight, Book I, Volume III, Huntoon, C.L., Grigoriev, A.I. and Antipov, V.V., Eds. (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia).
- ROBBINS, D.E. and YANG, T.C. (1994). "Radiation and radiobiology," pages 167 to 193 in Space Physiology and Medicine, third ed., Nicoglossian, A.E., Huntoon, C.L. and Pool, S.L., Eds. (Lea and Febiger, Philadelphia).
- SAWYER, D.M. and VETTE, J.I. (1976). AP-8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Minimum, NSSDC/WDC-A-R&S, 76-6 (National Space Science Center, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland).
- SIMONSEN, L.C., NEALY, J.E., SAUER, H.H. and TOWNSEND, L.W. (1991). "Solar flare protection for manned lunar missions: Analysis of the October 1989 Proton flare event," Paper 911351 in proceedings of the 21st International Conference on Environmental Systems, SAE Technical paper Series (Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania).
- SIMPSON, J.A. (1983). "Elemental and isotopic composition of the galactic cosmic rays," *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **33**, 323-381.
- SMART, D.M. (1988). "Predicting the arrival times of solar particles," Pages 101 to 110 in Interplanetary Particle Environment, Publication 88-28, Feynman, J. and Gabrielle, S., Eds. (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California).
- WILSON, J.W., BADAVID, F.F., CUCINOTTA, F. A., SHINN, J.L., BADHWAR, G.D., SILBERBERG, R., TSAO, C.H., TOWNSEND, L.W. and TRIPATHI, S.N. (1995). HZETRN: Description of a Free-Space Ion and Nucleon Transport and Shielding Computer Program, NASA Technical Paper 3495 (National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, Virginia).

## 宇宙放射線と生物学

## Biology Relevant to Space Radiation

R. J. Michael Fry (ORNL)

## 抄 録

宇宙放射線の二大組成、すなわち陽子と重イオンがヒトの健康に与える影響に関するデータは非常に限られている。したがって、宇宙放射線被ばくの影響を予測するためには、次の二つの手段に頼らざるを得ない。すなわち、(1)宇宙空間よりも高い線量率とフルエンスで照射した地上実験のデータ、または(2)ガンマ線やエックス線の研究成果からの外挿である。そして、長期宇宙ミッションの間に人体組織が受け得る宇宙放射線の線量、線量率およびエネルギーとLETスペクトルに関するより詳しい情報が必要である。特に放射線の質と生物効果の関連について、詳細な評価が必要とされている。確定的影響の場合、重要なのはしきい値である。長期宇宙ミッションにおいては、大量の太陽粒子発生(SPE: Solar Particle Event)の可能性も考慮されるべきである。しかしこれまでの種々の分析によると、線量率を限定できれば、このような影響を受容できるレベルまで低減する十分な防護対策は、現実的に実施可能である。もしこれらの分析結果が正しいと認められれば、主要な生物学的リスクは確率的影響(がん誘発)に留まるであろう。確率的影響のリスクに対する1回の太陽粒子発生(SPE)の寄与は、楽観視はできないが、長期の宇宙ミッションで受け得る総線量と比較すると大きいものではないだろう。

## 序 論

一般人および放射線関連作業員たちが地上で被ばくを受ける電離放射線の生物効果は、かなり詳しく分かってきている。この知見がリスク推定の基礎であり(NCRP, 1993a; UNSCEAR, 1993)、それが次に総合的、発展的な放射線防護システムを育成することにつながっている(ICRP, 1991; NCRP, 1993b)。

これらの情報の本質的な部分が、宇宙空間における放射線の生物効果および関連するリスクの推定に関する諸問題に適用されてきたし、現在も適用されている。

本論文の目的は、放射線の生物効果すべてを再検討することではなく、宇宙空間において遭遇する被ばくの結果として発生する生物効果に焦点をあてて論じることである。一般的には、宇宙空間における放射線の生物効果は地上におけるものと同じである。しかし、最も重たい荷電粒子が組織の一部にもたらす生物影響が他の高LET放射線に関するこれまでの知見から解釈できるかどうかという点については、あいまいな点がある。この特定の問題は別の機会にさらに詳しく議論する。

宇宙放射線の二大成分、すなわち陽子と重イオンがヒトに与える影響に関するデータは非常に限られていることを認識するべきである。したがって、宇宙飛行士に対する健康影響を予測するためには、すべて次の二つに依存する。すなわち(1)

宇宙空間に比べて高い線量率とフルエンスで照射した地上実験系でのデータ、または(2)線質係数を利用した線量当量の推定を伴うガンマ線やX線の影響に関する知見。

### 生物効果に影響を与える要素

Dr. Robbinsは量は少ないが重要な銀河宇宙放射線(GCR)の成分すなわち重イオンと同様、特に陽子および二次放射線の放射線環境と放射線の成分について記述している。これらの生物効果の理解とリスクの評価に重要な役割を果たす特質は、(1)特定の宇宙ミッションにおいて受ける可能性のある総線量、(2)線量率およびフルエンス率、(3)遷延(protraction)、および(4)粒子のLET、エネルギー、および飛跡構造である。

### 総線量

地球周辺の低軌道飛行の宇宙ミッションにおいて、総線量当量に影響を与える要素は；(1)活動時間、(2)高度、(3)軌道傾斜角、および(4)防護対策である。深宇宙ミッションの場合、散発的な太陽粒子発生(SPE)からの放射線も考慮に入れないといけない。

米国の宇宙飛行ミッションで受けた総線量は低いものであった。それは、スカイラブを除き、宇宙飛行の期間が短かったからである。これに対して、3年間の惑星間飛行中の被ばく線量は、低線量率でありながら、NCRPが地上で放射線業務従事者が就労中の被ばく限度として勧告している約1 Svの線量当量と同等になる可能性がある。高度と軌道傾斜角はともに放射線の量と線質に影響を与え、宇宙飛行の期間が長くなればなるほど防護が重要になってくる。

### 重視すべき生物効果

本シンポジウムの性質上、重視される生物効果は宇宙の放射線環境における被ばくの結果もたらされるリスクに関するものである。宇宙の探索において重視される生物効果は二つのカテゴリーに分けることができる。すなわち確定的影響と確率的影響である。地上の放射線業務従事者に対する放射線防護限度は、確定的影響の発生を防ぎ、確率的影響を受容できると認められる値に制限する

ための基準レベルを設定することである。どこまで許容できるかの選択が、当然、本シンポジウムの主題である。

確定的影響の場合、重要なのはしきい線量である。放射線防護の目的のためのしきい線量は、発生した影響が容易に検出できないか、臨床的な有意性を呈するレベルより低い値となる。被ばくが遷延的な場合、しきい線量は、精巣に対する影響を除き、ほとんど全ての確定的影響について著しく高い。例えば1年を超えて低地球軌道上において被ばくを受ける場合の確定的影響に対する防護として勧告されている線量当量限度は、1年で0.5 Sv(NCRP, 1989)で、これは $9 \times 10^{-7}$  Sv min<sup>-1</sup>と言い換えることができる。この程度の低線量率では、線量当量の影響は、高線量率における場合よりはるかに小さい。

骨髄や胃腸管(はき気や嘔吐を起こす)などに対する急性の確定的影響は、低軌道飛行や深宇宙で受ける宇宙放射線により発生することはない。急性確定的影響の可能性を考慮しなければならないのは、大量の太陽粒子発生(SPE)の場合である。総線量、特に線量率およびフルエンス率が急性確定的影響の起こる確率を決定する。

### 線量率およびフルエンス率

低地球軌道において経験される線量当量率は、地上よりは高いが、低いものである。最も高い線量率が認められるのは南大西洋磁気異常地域(SAA: South Atlantic Anomaly)を横断する時で、この時の陽子線被ばくの線量率は高度300kmで約0.002mGy min<sup>-1</sup>である。一日分を集積すると、線量当量率は約0.23mSvに達することがある。高度600km以上では1日あたりの線量は約1.6 mGyである(Badhwar et al., 1992)。

深宇宙における陽子の線量率と重イオンのフルエンス率も低線量率である。低線量率の定義は、表1に示すとおり、時代とともに変わってきてお

表1 低線量率とはなにか？

NCRP (1980)	0.05Gy y <sup>-1</sup>
ICRP (1991)	0.1Gy h <sup>-1</sup> (年換算では876Gy)
UNSCEAR (1993)	0.1mGy min <sup>-1</sup> (年換算では52.6Gy)

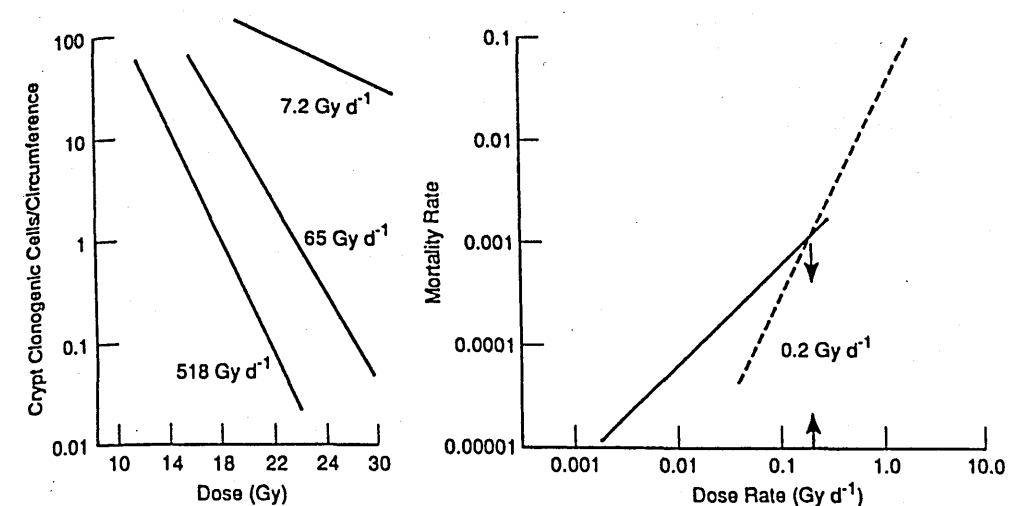


図1 左図：線量率7.2Gy d<sup>-1</sup>、65Gy d<sup>-1</sup>、518Gy d<sup>-1</sup>で照射した消化管組織横断面の円周当り小腸陰窩細胞の生存率(Fu and Phillips, 1975)。右図：マウスの死亡率を、日量(10-11h)線量率の関数として両対数紙上にプロットしたもの。矢印は、このレベル以下では寿命短縮が線量率と関係なくなり、総線量に影響を受ける線量率のおおよその値を示す。これは高線量率において実線から斜線への変化を説明するものである(Sacher and Grahn, 1964)。

り、どのレベルが低線量率であるかについてはかなり意見が分かれている。その理由は、一つにはこの問題に意見を寄せている種々の委員会が異なった局面を想定しているからである。図1に示したとおり、腸内にクローン生成細胞が生存する場合、線量率7.2Gy d<sup>-1</sup>で細胞死が著しく低下する。in vitro研究の結果からは、線量率低下の最大効果は約5.2Gy d<sup>-1</sup>で得られるとされている(Bedford and Mitchell, 1993)。しかし、寿命短縮が腫瘍による死亡率を超えるような低線量率で被ばくする場合、寿命短縮への影響が線量率に関係なくなる線量率は(死亡率の両対数目盛り上の斜線1は放射線線量率の関数)約0.2Gy d<sup>-1</sup>または約73Gy y<sup>-1</sup>である。この結果に基づくと、UNSCEAR(1993)が選択した0.1mGy min<sup>-1</sup>すなわち約53Gy y<sup>-1</sup>は確率的影響を考慮した場合妥当なものと思われる。未解決で非常に重要な問題は、放射線防護の目的でこれらの線量率に適用されるべき線量率効果係数はいくらかということである。ICRP(1991)は確率的影響について二つの係数を選んでいるが、確定的影響については係数を示していない。

いうまでもなく、線量率の影響は確定的および確率的影響のリスク推定にとって重要である。低地球軌道においては、すべての宇宙放射線は低線

量率である。深宇宙では、非常に大量の太陽粒子発生のピーク時に、高線量率で被ばくを受ける潜在リスクが存在する。SPEにおける放射線はほとんどすべてが非常に広いエネルギー分布をもつ陽子で構成されている。低線量率における陽子の生物効果の減少は、ガンマ線と同程度であると予想される。

長期宇宙ミッションでは、低線量率での被ばくが長時間継続し、総線量を第一義的に考慮しなければならない(Combes and Frits, 1991)。総線量の影響はin vitro細胞の生存率(Bedford and Mitchell, 1979)と胸腺リンパ腫誘発(Ulrich and Storer, 1979)に認められている。両方の事例とも、特定の線量に達すると影響が高まる傾向が見られた。

3年に及ぶ火星探査ミッション中に起こり得る最も強烈な粒子放出によって生じる最大線量率がどの程度になるかは明らかではない。1989年10月のSPEに基づくSimonsenら(1991)の分析によると、10.0g cm<sup>-2</sup>の遮蔽下でのピーク線量率は約0.4Sv d<sup>-1</sup>に達することがあるが、それは1日より短い期間であることも指摘されている。非常に大量のSPEの場合でも、十分な遮蔽によって宇宙船の中の線量率を確定的影響がでない低いレベルに

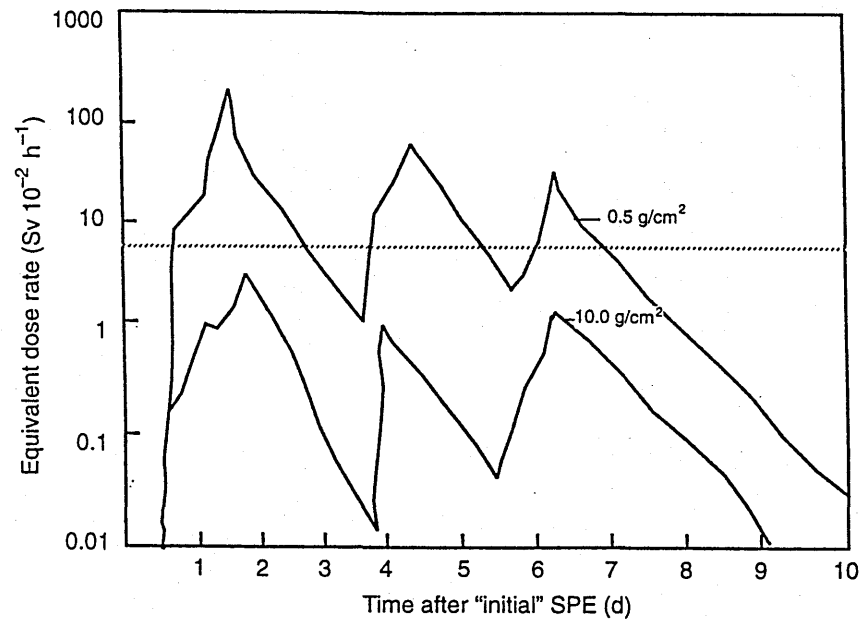
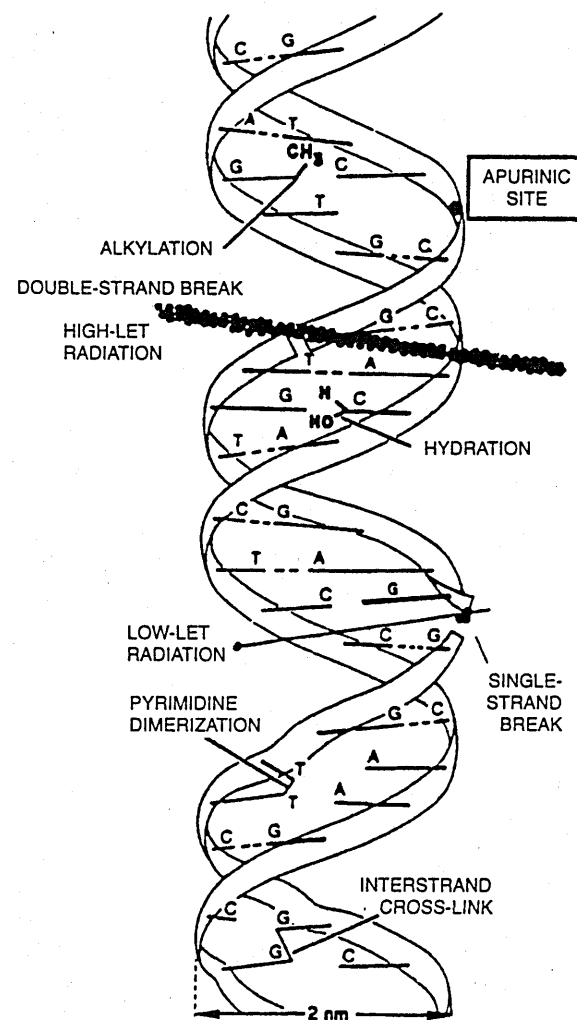


図2 等価線量率は、遮蔽を0.5および10.0 g cm<sup>-2</sup>として、1989年10月のSPEの発生後経過時間の関数として示してある (Simonsen et al., 1991)。



保つことは実際に可能であることを、これらの報告は示唆している。SPEの影響に関する予測の多くは、被ばく線量は高線量率であろうという仮説に基づいてきたと思われるが、その結果、これらの予測結果は急性障害のリスクを過大評価している。ただし、最悪のSPE時に経験されるであろう総線量と線量率についての、信頼できる推定は必要である。同様に、皮膚や消化管、骨髄の障害等、対象となる生物効果に対する線量率の影響に関する、信頼できる評価が行われるべきである。

確率的影響のリスクに対する1回の大量SPEの寄与は、楽観視できるものではないが、長期宇宙ミッションで受け得る総線量と比較してそれほど大きいものではない。

#### 放射線の線質と生物効果の関連性

深宇宙空間における放射線環境がもたらす生物効果の評価は、放射線の種類の複雑さのためは複雑なものになっている。エネルギーとLETのスペクトルは共に、地上の放射線環境におけるよりはるかに広い範囲に及ぶ。生物効果は、放射線のエネルギーやLET、飛跡構造に大きく左右される。

図3 高LET放射線(密)と低LET放射線(疎)の電離密度、および放射線が誘発する可能性がある障害のタイプを併記したDNA構造の概略図。

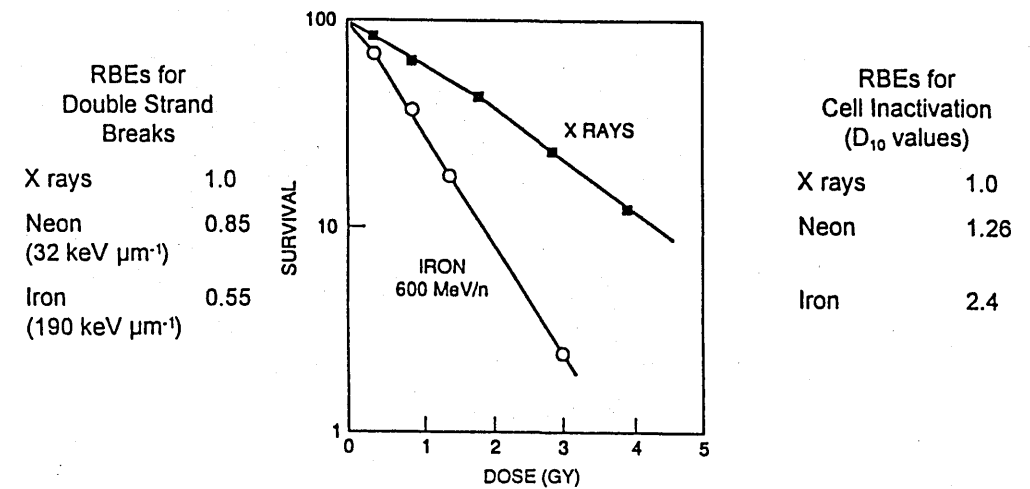


図4 X線および600 MeV u<sup>-1</sup>鉄イオンの線量とヒト線維芽細胞の不活性化率との関係。DNA 2本鎖切断のRBEとX線とネオンイオン、鉄イオンの不活性化率も併せて示す (Rydberg et al., 1994より)。

放射線防護に関するかぎり、異なった種類の放射線の影響は質的には同じであるが、量的にだけ異なるというのが放射線生物学の原則的考え方である。これは確定的影響と確率的影響の両方に成り立つと仮定されている。しかし、高LET放射線の影響と他のタイプの放射線による影響の間には多数の著しい相違がある。約30 keV μm<sup>-1</sup>以上のLETを持つ重荷電粒子の場合には、これらの相違は顕著なものになる。DNAに対する未修復損傷が、アルファ粒子や鉄イオンなどの極高LET放射線による場合とガンマ線とで大きく異なることは、電離の密度を考慮すれば驚くにあたらない(図3)。染色体異常や突然変異の発生やその特質に非常に重要な効果をもたらすDNA障害のスペクトルが異なっている (Ward, 1994; Rydberg et al., 1994)だけでなく、効果的かつ誤りなく修復する能力もまたLETで変化する (Ritter et al., 1977)。図4に見られるとおり、DNAの2本鎖切断の生物効果比(RBE)はLETに伴い低下するが、細胞不活性化のRBEは上昇する (Rydberg et al., 1994)。この説明はLETと共に増加するDNA切断の集中発生が、修復に必要な時間や修復時の誤りの増加をもたらすという事実によると思われる。

DNA障害および突然変異のタイプ別相対度数はLETに応じて変化する。しかし、紫外線により誘発されるp53特定突然変異 (Brash et al., 1991)で確認されていることを除けば、放射線により誘

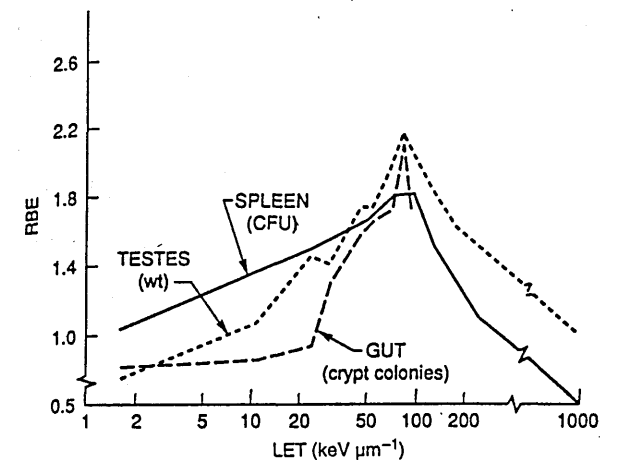


図5 (1)体重の低下を伴うような、マウス精巣内のクローン生成細胞の不活性化、(2)マウスの小腸陰窩細胞、および(3)マウスの脾臓内のコロニー形成単位(CFU-S)等の不活性化のRBEをLET keV μm<sup>-1</sup>の関数として表したものの (Ainsworth, 1986より改写)。

発される特定の突然変異は限られた条件下でしか確認されていない。サイン障害の調査は続いている。

in vitro細胞の不活性化と、細胞死を伴うin vivoでの確定的影響の生物効果比(RBE)は、LETが約100 keV μm<sup>-1</sup>になるとピーク値2に達する(図5)。増殖性組織では、増殖能力の喪失はLETとRBEの関係として説明される。中枢神経系(CNS)などの分割しない細胞の大集団をもつ組

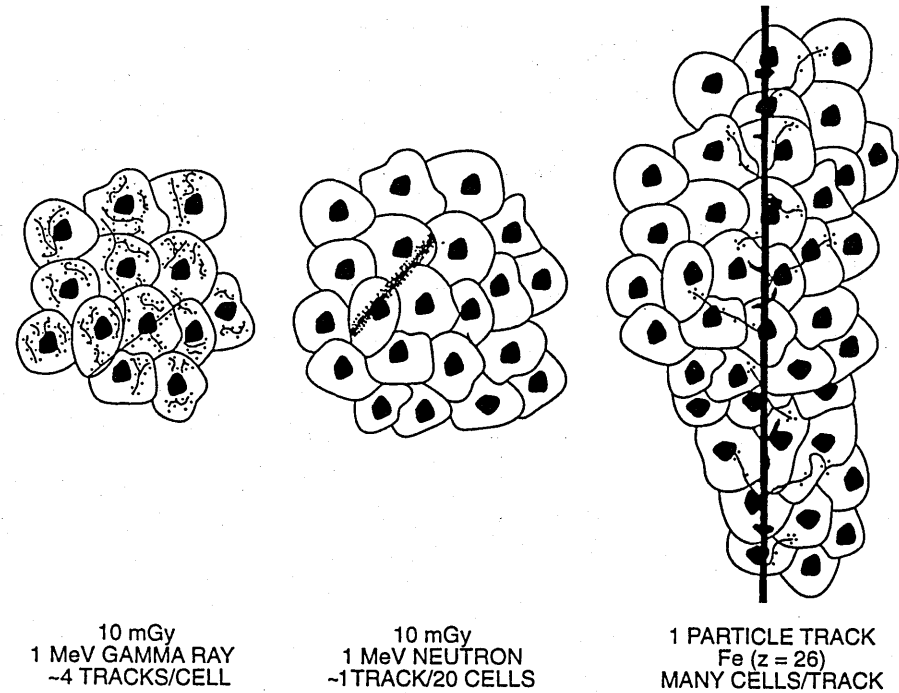


図6 低線量の低LET放射線と、二つのタイプの高LET放射線(1 MeVの中性子, 鉄イオン)がもたらす組織レベルのエネルギー沈着パターンの差を示す概略図。

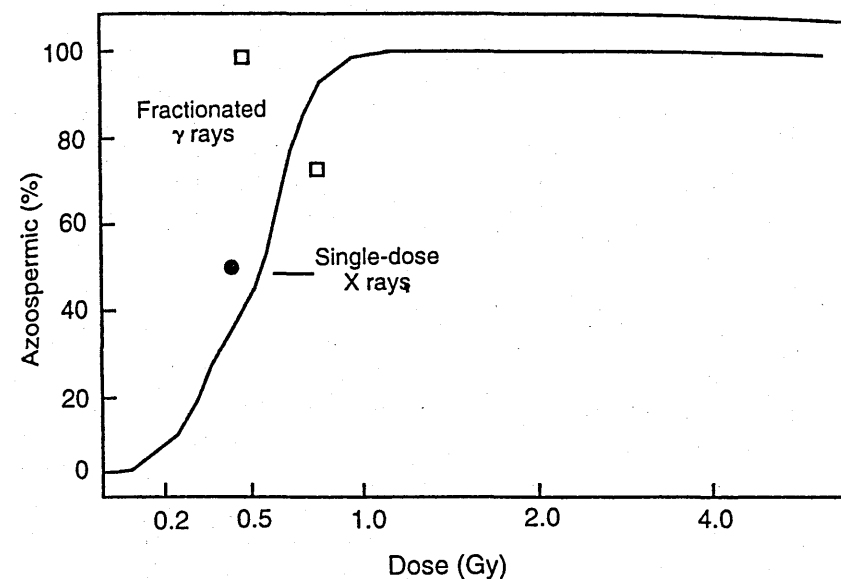


図7 X線の単一照射(●)およびガンマ線の分割照射(□)における、線量とヒト男性の無精子症比率との関係(Meistrich and van Beek, 1990より)。

織の場合、間期死滅が現在想定されているより多くないかぎり、低線量の陽子による急性影響は極微のはずである。陽子の長期被ばくの線量率は低地球軌道あるいは深宇宙において何れも低いので、予想される総線量による確定的影響は制限因子であり得ない。

重イオンについては、急性および晩発障害どちらのリスクに関しても、ほとんど分かっていない。フルエンス率は、特に高Zで高エネルギーの粒子ではごく小さいので、急性の確定的影響は起こり得ない。晩発性の確定的影響は問題になるかもしれない。解決する必要がある問題として、次のよ

表2 多重被ばくにより女性の永久不妊症を起こす総線量(Ash, 1980; Darmewood and Grochow, 1986より)

線量(Sv)	年齢15から40歳	40歳以上
0.6	影響なし	影響なし
1.5	大多数の女性に無影響	一部に不妊症のリスク
2.5-5.0	約60%が永久的に不妊化	—
>8.0	ほぼ100%が永久的に不妊化	—

うなことがある；

- (1)ニューロンが加齢とともに喪失する結果として起こる障害の有意なレベルがあるのか？
- (2)他のタイプの放射線とは明らかに異なるエネルギー沈着分布(図6)を持つ粒子飛跡の構造は、晩発障害の発生と重篤度を決定するものであるか？

などである。中枢神経系に対する晩発障害についてはほとんど知られていないが、これまでの研究結果から、時間遅れのあるDNAの損傷が起こることが示されている(Williams and Lett, 1994; 1996)。また、重イオンが比較的低い線量で神経化学的变化や行動パターンの変化を起こすことも指摘されている(Rabin et al., 1994)。

#### 陽子および高Z、高エネルギー粒子

##### 確定的影響

200MeV以下に限られるものであるが、陽子のRBE値についての利用可能なデータは、動物を用いた実験を通して集められ、DNA障害、突然変異、腫瘍誘発、および組織に与える確定的影響を広く網羅している。これらのデータは、RBEがガンマ線の場合と近似するものであることを示している。陽子を利用する放射線治療の経験から、正常なヒトの組織に対する急性影響については、RBEを約1とするのが妥当とされている。これは、陽子線の確定的リスクの確率がガンマ線の影響データに基づいて類推できることを示唆している。

陽子線をかなり被ばくした場合に、二つの影響、すなわち生殖能力の変化と白内障誘発が起こる可能性がある。他の生物効果とは対照的に、遷延的被ばくで男性の生殖能力に対する影響が弱められ

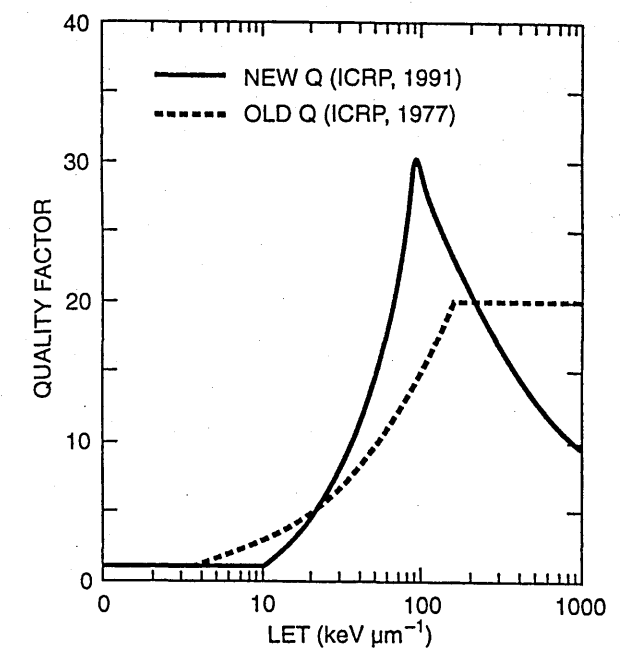


図8 1977年と1991年にICRPが提示した、LET(keV  $\mu\text{m}^{-1}$ )と線質係数との関係(Sinclair, 1996)。

ることはなく、増加することがある。精子生産の一時的な減少は比較的低い線量で起こることがあり(図7)、線量が増えると回復に要する時間が長くなる(Meistrich and van Beek, 1991参照)。女性の不妊症リスクに関する現時点で最善の推定値を表2に示す。この評価は、放射線治療を目的とした分割線量のデータに基づいており、長期に亘る低線量率被ばくの影響を過大評価する可能性があることに注意すべきである。

ヒトの白内障誘発の研究は放射線治療患者(Merriam and Fochet, 1957; Merriam et al., 1972)と原爆被ばく生存者(Otake and Schull, 1990)の両方について行われている。陽子線の分割効果と線量率の影響はガンマ線と同等であると仮定すると、白内障誘発の線量は4 Sv以上であろう。陽子線の単一照射をサルに対して行った研究(Lett et al., 1991)では、2 Gy以下の線量では視覚を著しく損なう白内障は誘発されないと報告されている。重イオンによるヒトの白内障誘発については、まだデータがなく、リスクの推定は動物実験研究のデータから推定しなければならない。高RBE値は中性子について報告されている(Otake and Schull, 1991; Vorgul et al., 1996)。

重イオンについては、Merriamら(1991)が $^{40}\text{Ar}$ イオンのRBEは0.05Gyにおいて40であると報告しており、Brennerら(1991)はこれらデータの分析から、重イオンについては線質係数は20よりも50が適切であると述べている。鉄イオンの影響に関するその後のデータ(Brenner et al., 1993)でも、線量0.01Gyにおいて高いRBEが確認されている。残念ながら、その様な低い粒子フルエンスでは、イオンが通過する細胞数の推定値が与えられていない。明らかなのは、異常な状態となり得る線維の数は少ないはずであるということである。

火星探査ミッション中に受け得る被ばくの結果発生する水晶体の混濁のリスクは、ある程度存在する。しかし、おそらく、加齢に伴う白内障が起こりやすくなる時期より前では、この障害で視覚を著しく損なうことはないであろう。

#### 確率的影響

ヒトのがん誘発に対する陽子線の効果は知られていないが、サル(Wood, 1991)、ラット(Burns et al., 1975; 1989)、マウス(Clapp et al., 1974)のデータに基づくと、ガンマ線のリスク推定値がほぼ適用できると考えられる。したがって、適切な線量率効果係数で修正した原爆被ばく生存者のデータに基づくリスクの推定値が応用できると考えられる。

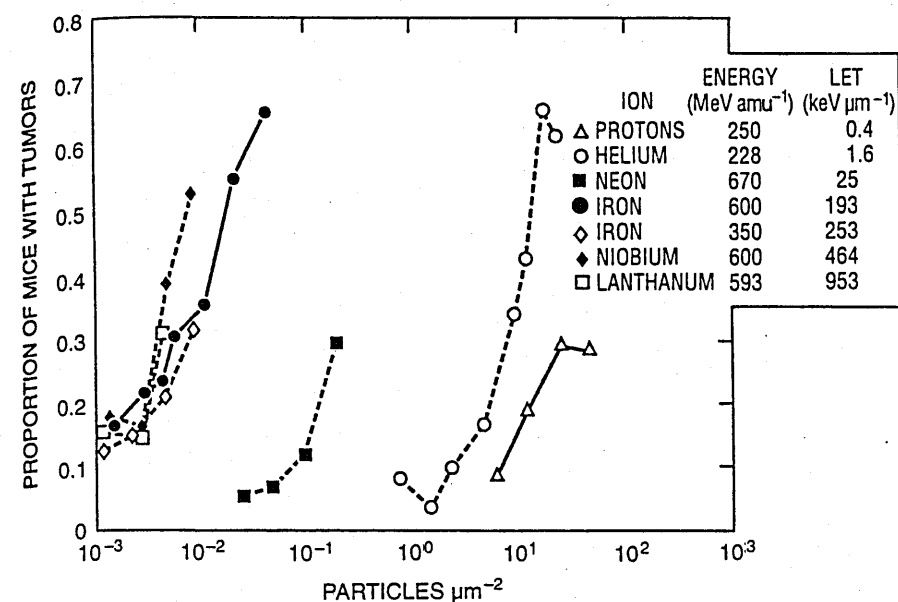


図10 粒子フルエンス(数 $\mu\text{m}^{-2}$ )に対して示した、ハーダー腺腫瘍発生マウスの比率。放射線のタイプは図中に示す通り(Alpen et al., 1994より)。

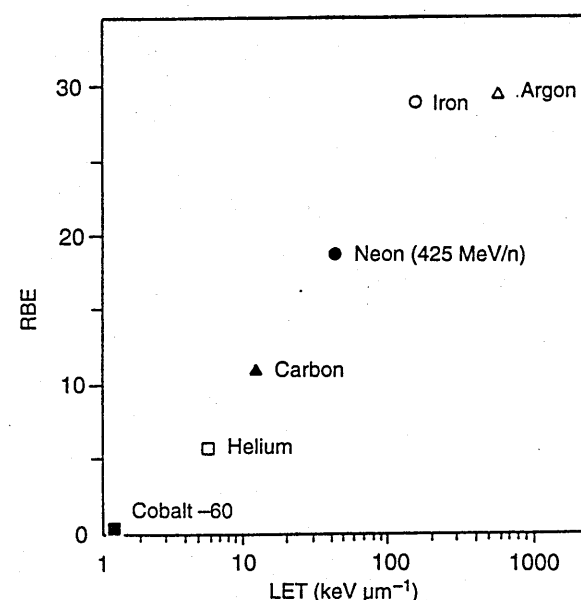


図9 マウスにおけるハーダー腺腫瘍発生のRBEとLET(keV  $\mu\text{m}^{-1}$ )との関係(Alpen et al., 1994; Fry et al., 1985より)。

る。重イオンの場合、がん誘発可能性の推定の問題はより複雑である。重イオンによるヒトのがん誘発に関するデータがないばかりでなく、実験研究のデータも限られた動物のものしかない(Alpen et al., 1994)。

低LET放射線に被ばくされた母集団について

得られたがん誘発データを重荷電粒子に応用するためには、LET分布から線質係数(Q)を求めなければならない。理論的には平均のQ値は、QのLETに対する関係式を使って積分により得ることができ。1990年ICRPは、Q-LET関係を1977年に勧告されたものから修正した(図8参照)。3つの重要な変更は以下のような点である：(1)Qの値はいくらか急勾配に上昇し、最大30に達する(1977年版の20に相当)、(2)Q値がピークとなるLETが1977年版よりも少し低く、LETが $100\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ の時Qは最大値に達する、(3)Q値が、ピーク値からLETが $1,000\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ の時の約10まで低下する(これとは対照的に1977年版ではLET値が約 $100\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ を超えるとQ値は20で安定する曲線であった)。この後半の曲線は、Lを $\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ で表される放射線のLETとして、 $300 \times L^{-0.5}$ で記述される。

LETが $100\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ より低い放射線のQ-L関係の問題に取り組んでいる唯一のデータはハーダー腺腫瘍誘発に関するものである(図9と10)。この事例における効果は、LETが約 $100\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ (図9)で、粒子フルエンス( $\mu\text{m}^{-2}$ )が $5 \times 10^{-2}$ と $1 \times 10^{-2}$ の間において最大値約30に達し、LETまたはフルエンスの関数として腫瘍の罹患率をプロットすると、増加傾向を示す。この腫瘍系においては、LETが $100\text{keV } \mu\text{m}^{-1}$ よりかなり大きくなるとその効果が低下するという証拠は今のところないのである。これら結果は、ICRP(1991)のQ-L関係とは対照的である。今後、他のより代表的な組織における腫瘍誘発のデータが必要である。

吸収線量、線質係数、および線量当量が適切なアプローチであるか否かについては異議が唱えられてきた(Bond et al., 1985; Zaider and Brenner, 1985)。Curtisら(1992; 1995)は、銀河宇宙線によるがん誘発リスクの推定にリスク断面積を利用することを示唆している。このリスク断面積は、特定のがんを誘発させる確率を、特定の種類とエネルギーまたはLETの粒子の単位フルエンス当たりで表したものと定義される。図10は、データが必要とされている放射線のタイプを示している。ただし、異なる種類の放射線のリスク断面積は、代表的ながんについて未だ知られていないので、今のところ線質係数を使わざるを得ない。

#### 結 論

宇宙船または月面で使うような防護システムの遮蔽が無い場合を除き、低地球軌道および深宇宙における長期宇宙ミッションにおいては、急性影響は重大関心事ではない。ただし、警報システム、宇宙ミッションの管理体制、および遮蔽によって、「show stopper」事故と呼ばれるような事例が起こらないようにしなければならない。大型のSPE(太陽粒子発生)がもたらすリスクの推定は、線量率効果が考慮されていないと思われ、臓器レベルにおける放射線の線量、線量率、およびエネルギーとLETスペクトルに関する精度の高い情報が、必要な防護手段を立案するために必要である。

晩発影響の推定は、重イオンの確率的、確定的影響両方に関する知識が欠如しているため、可能であるが不確実性が高い。現在、低線量率における確率的影響は、高線量率における場合よりファクター2程度低いと考えられている。長期被ばくの晩発影響と急性高線量率被ばくの影響の差を定量化することは、低線量率の宇宙放射線被ばくの影響をより正確に論じるために、重要なことである。

このシンポジウムの目的に直接関連する疑問は、長期宇宙ミッションのリスクが容認できるか否かの問題に取り組む前段階として、そのリスクを十分確実に定量化できるか、ということである。その答えはイエスであるが、そのためには重イオンの影響を直接的に確定するための調査研究が必要である。

#### 参考文献

- AINSWORTH, E. T. (1986). "Early and late mammalian responses to heavy charged particles," *Adv. Space Res.* 6, 153-166.
- ALPEN, E. L. POWERS-RISUS, P., CURTIS, S. B. DEGUZMAN, R. and FRY, R. J. M. (1994). "Fluence-based relative biological effectiveness for charged particle carcinogenesis in mouse harderian gland," *Adv. Space Res.* 14, 573-581.
- ASH, P. (1980). "The influence of radiation on fertility in man" *Brit. J. Radiol.* 53, 571-278.
- BADHWAR, G. D., KONRADI, A., HARDY, Y.



- and BRABY, LA(1992). "Active dosimetric measurements on shuttle flights," *Nud. Tracks Radiat. Meas.* **20**, 13-20.
- BEDFORD, J. S. and MITCHELL, J. B. (1973). "Dose rate in synchronous mammalian cells in culture," *Radiat. Res.* **54**, 316-327.
- BOND, V. P., VARMA, M. N., SONDHAAUS, C. A. and FEINENDEGEN, L. E. (1985). "An alternative to absorbed dose, quality and RBE at low exposures," *Radiat. Res.* **8**, S52-S57.
- BRASH, D. E, RUDOLPH, J. A, SIMON, J. A, LIN, A., MCKENNA, G. J., BADEN, H. P., HALPERIN, A. J. and PONTEN, J. (1991). "A role of sunlight in skin cancer: UV-induced p53 mutations in squamous cell carcinoma," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **88**, 10124-10128.
- BRENNER, D. J., MEDVEDOVSKY, C., HUANG, Y., MERRIAM, G. R. JR. and WORGUL, B. V. (1991). "Accelerated heavy particles and thelers. VI. RBE studies at low doses," *Radiat. Res.* **128**, 73-81.
- BRENNER, D. J., MEDVEDOVSKY, C., HUANG, Y., and WORGUL, B. V. (1993). "Accelerated heavy particles and thelers. VIII. Comparison between the effects of acute low doses of iron ions (190 keV/ $\mu$ m) and argon ions (88 keV  $\mu$ m)," *Radiat. Res.* **133**, 198-203.
- BURNS, R. J., ALBERT, R. E, VANDERLAAN, M. and STRICKLAND, P. (1975). "The dose-response curve for tumor induction with single and split doses to 10 MeV prations" *Radiat. Res.* **62**, 598
- BURNS, R. J., ALBERT, R. E, and GARTE, S. J. (1989). "Radiation-induced cancer in rat skin," *Carcinog Compr. Surv.* **11**, 293-319.
- CARNES, B. A. and FRITZ, T. E (1991). "Responses of the beagle to protracted irradiation. I. Effect of total dos and dose rate," *Radiat. Res.* **128**, 125-132
- CLAPP, N. K, DARDEN, D. B, JR. and JERNIGAN, M. C. (1974). "Relative effects of whole-body sublethal doses of 60 MeV protons and 300 kVp x rays on disease incidence in RF mice," *Radiat. Res.* **57**, 158-186.
- CURTIS, S. B, TOWNSEND, L. W., WILSON, J. W., POWERS-RISIUS, P., ALPEN, E. L and FRY, R. J. M. (1992). "Fluence-related risk coefficients using the Harderian gland data as an example," *Adv. Space Res.* **12**(2-3), (2)407-(2)416.
- CURTIS, S. B, NEALY, J. E and WILSON, J. W. (1995). "Risk cross sections and their application to risk estimation in the galactic cosmic-ray environment," *Radiat. Res.* **141**, 57-65.
- DAMEWOOD, M. D. and GROCHOW, L. B. (1986). "Prospects for fertility after chemotherapy and radiation for neoplastic disease," *Fertil. Steril.* **45**, 443-459.
- FRY, R. J. M., POWERS-RISIUS, P., ALPEN, E. L and AINSWORTH, E. J. (1986). "High-LET radiation carcinogenesis," *Radiat. Res.* **8**, S188-S195.
- FU, K. and PHILLIPS, T. L (1975). "Tumor and normal tissue response to irradiation in vivo: Variation with decreasing dose rate," *Radiology* **144**, 709-716.
- ICRP (1991). International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21 (Pergamon Press, Elmsford, New York).
- LETT, J. T., LEE, A. C. and COX, A. B. (1991). "Late cataractogenesis in rhesus monkeys irradiate with protons and radiogenic cataract in other species," *Radiat. Res.* **126**, 147-156.
- MEISTRICH, M. L. and VAN BEEK, M. F. A. B. (1990). "Radiation sersitivity of the human testis," *Adv. Radiat. Bid.* **14**, 227-268.
- MERRIAM, G. R, JR. and FOCHT, E. F. (1957). "A clinical study of radiation cataracts and the relationship to dose," *Am. J. Roentgenol.* **77**, 759-785.
- MERRIAM, G. R. JR., SZECHTER, A. and FOCHT, E., F. (1972). "The effects of ionizing radiations on the eye," *Front. Rad Ther. Oncol.* **6**, 346-385.
- MERRIAM, G. R., JR. WORGUL, B. V., MEDVEDOVSKY, C., ZAIDER, M. and ROSSI, H. H. (1984). "Accelerated heavy particles and thelens. I. Cataractogenic potential," *Radiat. Res.* **98**, 129-140.
- NCRP (1980). National Council on Radiation Protection and Measurements. Influence of Dose and its Distribution in Time on Dose-Response Relationships for Low-LET Radiations, NCRP Report No.64 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- NCRP (1989). National Council on Radiation Protection and Measurements. Guidance on Radiation Received in Space Activities, NCRP Report No.98 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- NCRP (1993a). National Council on Radiation Protection and Measurements. Risk Estimates for Radiation Protection, NCRP Report No.115 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- NCRP (1993b). National Council on Radiation Protection and Measurements. Limitation of Exposure to Ionizing Radiation, NCRP Report No.116 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, Maryland).
- OTAKE, M. and SCHULL, W. J. (1990). "Radiation-related posterior lenticular opacities in Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivors based on the DS86 dosimetry system," *Radiat. Res.* **121**, 3-13.
- OTAKE, M. and SCHULL, W. J. (1991). "A review of 45 years study of Hiroshima and Nagasaki atomic bomb Survivors: Radiation cataract," *Radiat. Res.* (Tokyo) **32**, S283-S293.
- RABIN, B. M., JOSEPH, J. A, HUNT, W. A. DALTON, T. B. KANDASAMY, S. B. HARRIS, A. H. and LUDEWIGT, B. (1994). "Behavioral endpoints for radiation injury," *Adv. Space Res.* **14**, 457-466.
- RITTER, M. A, CLEAVER, J. E and TOBIAS, C. A. (1977). "High-LET radiations induce a large proportion of non-rejoining DNA breaks," *Nature* **286**, 653-655.
- RYDBERG, M. B., LUBRICH, M. and COOPER, P. K (1994). "DNA double-strand breaks induced by high-energy neon and iron ions in human fibroblasts. I. Pulsed-field gel electrophoresis method," *Radiat. Res.* **139**, 133-141.
- SACHER, G. A and GRAHN, D. (1964). "Survival of mice under duration-of-life exposure to gamma rays/the dosage-survival relation and the lethality function," *J. Natl. Cancer Inst.* **32**, 277.
- SIMONSEN, L. C., NEALY, J. E. SAUR, H. and TOWNSEND, L (1991). "Solar flare protection for mamed lunar missions Analysis of the October 1989 proton flare evant," PAE Technical Paper Series No.911351 (Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pernnsylvania).
- SINCLAIR W. K (1996). "The present system of quantities and units for radiation protection," *Health Phys.* **70**, 781-786.
- ULLRICH, R. L. and STORER, J. B. (1979). "Influence of gamma ray irradiation on the development of neoplastic disease in mice. III Dose-rate effects," *Radiat. Res.* **80**, 325-342.
- UNSCEAR (1993). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Annex F: Influence of dose and dose rate on stochastic effects of radiation," pages 620-714 in Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, No.E94IX.2(United Nations Publications, New York).
- WARD, J. F. (1994). "The complexity of DNA damage: Relevance to biological consequences," *Int. J. Radiol. Biol.* **66**, 427-432.
- WILLIAMS, G. R. and LETT, J. T. (1994). "Effects of 40Ar and 56Fe ions on refinal photoreceptor cells of the rabbit: Implication for mamed missions to Mars," *Adv. Space Res.* **14**, 217-220.
- WILLIAMS, G. R. and LETT, J. T. (1995). "Damage to the photoreceptor cells of the rabbit

refinal for  $^{56}\text{Fe}$  ions: Effects of age at exposure," *Adv. Space Res.* **18**, 55-58.

WOOD, D. H. (1991). "Long-term mortality and cancer risk in irradiated rhesus monkeys," *Radiat. Res.* **126**, 132-140.

WORGUL, B. V., MEDVEDOWSKY, C., HUANG Y., MARINO S. A, RANDERS-PEHRSON, G.

and BRENNER, D. J. (1996). "Quantitative assessment of the cataractogenic potential of very low doses of neutrons," *Radiat. Res.* **145**, 343-349.

ZAIDER, M. and BRENNER, D. J. (1985). "On the microdosimetric definition of quality factors," *Radiat. Res.* **103**, 302-316.