

有人サポート委員会 宇宙放射線被曝管理分科会 中間報告の公表について

平成11年3月3日
宇宙開発事業団

1. 報告事項

「有人サポート委員会 宇宙放射線被曝管理分科会 中間報告」を事業団外部に公表することについて報告する。

2. 経緯

(1)宇宙開発事業団においては、国際宇宙ステーション(ISS)に長期滞在する日本人宇宙飛行士の宇宙放射線被曝管理運用に係り、下記項目からなるガイドラインの設定を検討している。

- ・宇宙飛行士の線量限度
- ・モニタリング及び線量評価手法
- ・教育／訓練及び合意等の必要要件
- ・放射線障害防止のための健康管理計画

(2)上記の検討にあたり、平成9(1997)年5月、事業団の外部諮問委員会 有人サポート委員会のもとに組織された宇宙放射線被曝管理分科会（分科会長：佐々木康人 放射線医学総合研究所長）の意見を聞きながら作業を進めてきた。

(3)発足から現在まで、分科会以外の専門家及び日本人宇宙飛行士の意見も反映させつつ作成した資料をもとに、8回にわたる分科会会合等において審議いただいた。

(4)今般、分科会が、これらの審議の結果、放射線被曝管理の重要な部分をなす線量限度について、広く学界等の評価を受けることが必要との考え方で「中間報告」をまとめたので、ここに公表するものである。

3. 中間報告の提案する線量限度の考え方及び骨子（別紙に中間報告骨子を示す）

宇宙ステーションに日本人宇宙飛行士が長期滞在するにあたって受容可能な限度(案)を示すにあたり、次の考え方が採られている。

- ・全身の線量限度は、がん、遺伝的影響のリスクが容認ないしは耐容可能なレベル以下になる生涯線量値を算定。
- ・精巣、水晶体、骨髓、皮膚の線量限度は、それぞれの組織の障害の発生を予防するため、期間別(短時間、年間、生涯)に、原則としてICRP(国際放射線防護委員会)が提示している「しきい値」(影響を生ずる最小値)に準拠。
- ・ISSでの被曝管理運用に当たっては、計画参加各極との調整により、「放射

線被曝を合理的に達成できる範囲で可能な限り低く抑える。」という放射線防護の原則(ALARA 原則)に則り、被曝線量を低減するよう努めるべき。

なお、ISS における宇宙放射線被曝管理運用は参加各極共通に行われる必要があるが、上記の考え方、及び今後の分科会における審議をもとに、線量限度、モニタリングと線量評価手法、緊急時の対処手法などについて国際調整を図っていく予定である。

4. 今後の予定

(1) 中間報告の取扱い

- ・ 3月3日(水) 宇宙開発委員会 報告 (外部公表)
TBD 同 安全評価部会 報告
- ・ TBD 科学技術庁 放射線審議会 報告
半年程度、学会／インターネット等を通じ、一般からの意見を受け付け、分科会の最終報告に反映する。

(2) 分科会での今後の審議

今後1年程度を目途に、残された次の課題について、関係機関等と調整をとりつつ、調査審議を行い、最終報告をまとめる。

- ・ モニタリングと線量評価手法
モニタリング機器、太陽フレア予測手法、等
- ・ 教育／訓練、合意等の必要要件
教育/訓練項目(放射線の人体影響、緊急時の対処方法、等)、保健指導のあり方、等
- ・ 放射線障害防止のための健康管理計画
健康診断(項目・頻度)、等

以 上

(附)宇宙放射線被曝管理分科会委員名簿

	氏名	所属・役職
分科会長	佐々木 康人	放射線医学総合研究所長 (前 東京大学医学部教授(放射線医学))
委員	安藤 興一	放射線医学総合研究所 第3研究グループ 第1サブグループリーダー
"	岩崎 民子	(財)放射線影響協会 放射線疫学調査センター長
"	草間 朋子	大分県立看護科学大学長 (前 東京大学医学部助教授(放射線健康管理学))
"	河野 毅	理化学研究所 宇宙放射線研究室副主任研究員
"	小佐古 敏荘	東京大学 原子力研究総合センター助教授
"	中村 尚司	東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター教授
"	藤高 和信	放射線医学総合研究所 第3研究グループ 総合研究官
"	馬淵 清彦	(財)放射線影響研究所 疫学部長

() 内に調査・審議開始時の前職を示した。

宇宙放射線被曝管理分科会中間報告 骨子

1. はじめに

中間報告の位置づけ

- ・国際宇宙ステーションに長期滞在する日本人宇宙飛行士の放射線被曝の線量限度について、現段階における調査検討状況を公表する。
- ・本中間報告は、宇宙開発事業団の放射線健康管理担当部門の案をもとに、当分科会が放射線関連分野の視点から審議・議論し、容認ないしは耐容可能と考えられるもの。
- ・宇宙開発や放射線防護に携わる、または関心のある国民各位のご意見等をいただきたい。

2. 宇宙放射線環境

国際宇宙ステーション搭乗員の宇宙放射線被曝線量の推定値

- ・通常の宇宙放射線環境で船内にいる場合：1mSv/日 程度（全身）。
- ・太陽フレア（SPE）時船内にいる場合：太陽フレアの規模により通常時の数倍～数十倍程度（全身）。
- ・船外活動時：通常時船内での線量の数倍程度（全身）。特に体表に近い組織／臓器では、相対的に線量が大きくなる。

3. 宇宙放射線被曝の人体影響

- ・一般に放射線による人体への影響は次のように分類される。
 - 確率的影響：影響の発現に線量のしきい値（影響が起こるために必要な最小値）がなく、線量の増加とともに発現確率が増加するもの。（例：がん、遺伝的影響）
 - 確定的影響：影響の発現に線量のしきい値があり、線量がしきい値を越えるまでは影響は発現せず、しきい値を越えると線量の増加とともに影響が重くなるもの。（例：不妊、白内障等）
- ・宇宙放射線特有の影響：高エネルギー重イオン（HZE 粒子）の影響、及び微小重力下での放射線影響については、今後も引き続き知見の集積が必要である。

4. 確率的影響の評価

確率的影響の防護は、放射線被曝によるリスクを容認可能なレベルに抑えるため、生涯に被曝する線量を制限することにより実施することが妥当と思われる。

○生涯線量限度（全身）設定の基本的考え方

- a. 主として寄与生涯がん死亡確率（生涯にわたってがんで死亡する確率の、放射線の影響による増加分）を用いて線量限度を設定する。

- b. 日本人宇宙飛行士に最大限許容されうる寄与生涯がん死亡確率は3～5%¹であるとして線量限度を設定する。
- c. 最も想定されやすい滞在様式で被曝した場合に、寄与生涯がん死亡確率がほぼ3%となるように線量限度を決め、その線量限度内で最もリスクが高くなるような滞在（毎年滞在）を行った場合でも5%を越えないことを確認する。²

○提案する生涯線量限度（全身：実効線量当量）

（単位：Sv）

被曝開始年齢	27	30	35	40	45
男	0.6	0.9	1.0	1.2	1.2
女	0.6	0.8	0.9	1.1	1.1

表中にない被曝開始年齢の生涯線量限度は、その被曝開始年齢より若い表中の被曝開始年齢のものを用いる。

5. 確定的影響の評価

確定的影響の防護は、原則としてすべての組織・臓器に対する影響のしきい値を越えないように、その組織・臓器ごとに線量を制限することが妥当である。

○組織線量限度設定の基本的考え方

- a. 原則として、ICRP 文書(No.41 等)で示されているしきい値に準拠する。³
- b. 各組織・臓器の影響のしきい値と被曝推定線量を比較し、宇宙飛行中・後に起こりうる影響⁴について、組織線量限度を設定する。
- c. 一律な限度設定により宇宙飛行士の活動を過度に制限することになる場合は、限度を設定せず、「参考レベル」を示し、本人の意思に十分留意して飛行計画を立案することが妥当である。⁵

¹ 根拠：

- ・ICRP（国際放射線防護委員会）文書 No.60(1991)：地上での職業被曝の線量限度（=20mSv/年）を就業年齢期間中毎年被曝した場合、寄与生涯がん死亡確率は3.6%となる。
- ・NCRP（米国放射線防護・測定審議会）報告書 No.98(1989)：安全性が中程度の職業と比較し、宇宙飛行士に容認可能なリスクレベルを、致死がんの自然リスクの 1/5～1/6 である寄与生涯がん死亡確率 3%とすることが妥当としている。
- ・日本人の致死がんの自然リスクは、約 30%であるので、その 1/6 は 5%。

² 同じ生涯線量を受けても、宇宙ステーションへの滞在様式（被曝様式：毎年滞在するのか、数年に1回しか滞在しないのか等）により、リスクレベルが異なる。最も想定されやすい滞在様式は3年ごとに3回程度。

³ 骨髄の線量限度については、ICRP 文書 No.41 のしきい値が明確でない（>0.4Sv）ので独自の文献調査により決定。（【別添2】【別添3】）

⁴ 精巣／一時的不妊・永久不妊、水晶体／白濁、骨髄／造血能低下、皮膚／早期紅斑・晩発性萎縮が、それぞれのしきい値と推定線量とを比較すると、起こりうると判断される。

⁵ 精巣／一時的不妊のしきい値を「参考レベル」とした。また、次世代への影響を含めた情報提供のあり方等については、今後さらに検討を加え、宇宙飛行士の健康管理計画に反映する。（【別添1】）

○提案する組織線量限度（線量当量）

組織・臓器	1 回短時間 [¶] (Sv)	1 年間 (Sv/年)	生涯 (Sv)
精巣	—	2	—
水晶体	0.5	1	5
骨髓	—	0.5	—
皮膚	2	4	20

¶：ここで、1 回短時間とは 1 回の太陽フレア（SPE）等、宇宙環境の変動または宇宙飛行士の滞在状況の変化により一時的に被曝線量が高くなる期間を指す。

○提案する参考レベル

精巣／一時的不妊： 1 回短時間 0.15Sv、1 年間 0.4Sv/年

6. 今後の課題

本分科会としては、国際宇宙ステーションに長期滞在する日本人宇宙飛行士の宇宙放射線被曝管理運用に係るガイドライン設定のために、残された下記項目について検討していく予定である。

- ①放射線モニタリングと線量評価手法
- ②放射線防護に係る宇宙飛行士の教育・訓練及び合意のありかた
- ③放射線障害防止のための健康管理計画

【別添 1】

低線量における造精機能抑制に関する知見について調査。

○精巣腫瘍低線量放射線治療後の精子数観察（3 施設、37 症例）

- ・ICRP 文書 No.41 の示す「しきい値」以下でも有意な減少が見られた例がある。
- ・特異例（治療前からの乏精子、観察からの脱落）を除き、長期を要するが回復を観察。

○低線量放射線による精子染色体異常

- ・同種の調査で、精子染色体異常の増加がみられた／みられなかった、のいずれの結果も報告されている。
- ・原爆被爆者二世では、染色体異常の増加は認められていない。

【別添 2】

低線量における造血機能抑制に関する知見について調査。

○放射性同位元素による悪性腫瘍部位選択照射データ（4 施設）

- ・骨髓線量 0.5Sv 程度によっては、少なくとも臨床的に問題となる血小板/白血球減少はみられていない。

【別添 3】

宇宙飛行に伴う免疫低下に関する総説を紹介。

- ・心理的・肉体的ストレス、又は無重力環境そのものによると考えられる白血球数減少、リンパ球反応性低下等について多くの報告あり。

(参考)

○基本的な用語については、中間報告本文中に用語集を付した。

○なお、中間報告本文中には触れていないが、日常生活における放射線被曝は概ね次の通りである。(放射線医学総合研究所ホームページより：実効線量当量)

- | | | |
|------------------------|----------|-----------------|
| ・胃の X 線集団検診 (1 回) : | 4 mSv | |
| ・一般人の自然放射線被曝量 (年間) : | 1.1 mSv | - 宇宙から 0.35 mSv |
| | | - 大地から 0.4 mSv |
| | | - 食物から 0.35 mSv |
| ・胸の X 線集団検診 (1 回) : | 0.3 mSv | |
| ・ヨーロッパへのジェット機飛行 (往復) : | 0.07 mSv | |

有人サポート委員会
宇宙放射線被曝管理分科会
中間報告

平成11年3月

宇宙開発事業団

目次

1. はじめに	1
2. 宇宙放射線環境	4
2. 1 船外宇宙放射線環境	4
2. 2 船内宇宙放射線環境	8
2. 2. 1 船内宇宙放射線環境の推定	8
2. 2. 2 船内宇宙放射線環境の測定	11
2. 3 宇宙放射線被曝線量	11
2. 3. 1 宇宙放射線被曝の評価に用いる量	11
2. 3. 2 宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定	13
2. 3. 2. 1 通常時の線量の推定	14
2. 3. 2. 2 太陽フレア時の線量の推定	14
2. 3. 2. 3 船外活動（EVA）時の線量の推定	15
3. 宇宙放射線被曝の人体影響	16
4. 確率的影響の評価	18
4. 1 確率的影響とその管理	18
4. 2 確率的影響のリスク評価に用いる属性とその算定方法	18
4. 3 「容認～耐容可能」のリスクレベル	22
4. 4 提案する生涯線量限度	28
5. 確定的影響の評価	36
5. 1 確定的影響と「しきい値」	36
5. 2 確定的影響のRBE	38
5. 3 確定的影響の防護	45
5. 3. 1 宇宙飛行士の確定的影響の防護の考え方	45
5. 3. 2 宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定値と確定的影響のしきい値との比較	46
5. 3. 2. 1 通常の船内環境における組織線量当量推定値との比較	46
5. 3. 2. 2 SPE 時及び船外活動時における組織線量当量推定値との比較	47
5. 4 組織線量限度	49
5. 4. 1 提案する組織線量限度	49
5. 4. 2 組織線量限度の運用	52
6. 今後の課題	53
○ 用語集	55
【別添1】低線量による造精機能抑制	1-1
【別添2】低線量による造血機能抑制	2-1
【別添3】宇宙飛行に伴う免疫低下	3-1

図一覧

図 2-1	宇宙放射線環境の概略	5
図 2-2	国際宇宙ステーション軌道における銀河宇宙線の元素組成	5
図 2-3	国際宇宙ステーション軌道における船外放射線エネルギースペクトル推定 (SPE を考慮しない)	6
図 2-4	国際宇宙ステーション軌道での太陽フレア陽子及び銀河宇宙線陽子の エネルギースペクトル推定	7
図 2-5	人工衛星「おおぞら」による低高度(500-700km)における陽子強度分布	9
図 2-6	国際宇宙ステーション軌道における船外宇宙放射線エネルギースペクトル推定 (船壁 9.5mm)	10
図 2-7	国際宇宙ステーション軌道における船外宇宙放射線エネルギースペクトル推定 (船壁 67.17mm)	10
図 2-8	スペースシャトル内で計測された LET スペクトル(国際宇宙ステーション軌道)	12
図 2-9	1989 年 10 月の太陽フレア時に、ロシアの MIR 内で計測された積算線量の推移	15
図 5-1	陽子、重粒子の確定的影響の RBE 値と ICRP Publ.60 の Q(L)値との比較	42
図 5-2	中性子の確定的影響の RBE(又は RBE _m 値)と ICRP Publ.60 の Q(L)に基づく 全身及び生殖腺の中性子 AP 照射の平均線質係数との比較	43

表一覧

表 1-1	宇宙放射線被曝管理分科会委員名簿	2
表 1-2	宇宙放射線被曝管理分科会調査検討状況	3
表 2-1	宇宙ステーション軌道での種々のケースにおける被曝線量推定値	13
表 2-2	スペースシャトルでの宇宙放射線線量計測	14
表 3-1	微小重力と放射線の生物学的影響の関係に関する研究例	17
表 4-1	確率的影響のリスク評価に用いる属性と計算方法の概要	20
表 4-2	諸属性の算定条件	21
表 4-3	確率的影響のリスク評価に用いる属性の算定に用いた宇宙ステーション滞在条件 (被曝条件)	21
表 4-4	1 回被曝による男性宇宙飛行士の損害の諸属性	23
表 4-5	1 回被曝による女性宇宙飛行士の損害の諸属性	23
表 4-6	10 年間の長期被曝による男性宇宙飛行士の損害の諸属性	24
表 4-7	10 年間の長期被曝による女性宇宙飛行士の損害の諸属性	24

表 4-8	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の 男性宇宙飛行士の損害の諸属性	25
表 4-9	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の 女性宇宙飛行士の損害の諸属性	25
表 4-10	1 年間のミッションを 3 年間隔で 5 回行った場合の 男性宇宙飛行士の損害の諸属性	26
表 4-11	1 年間のミッションを 3 年間隔で 5 回行った場合の 女性宇宙飛行士の損害の諸属性	26
表 4-12	NCRP の現行及び提案されている生涯線量限度	27
表 4-13	作業者集団の被曝による損害の諸属性(ICRP60 表 5 より)	27
表 4-14	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の男性宇宙飛行士の 寄与死亡の確率	29
表 4-15	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の女性宇宙飛行士の 寄与死亡の確率	29
表 4-16	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の男性宇宙飛行士の 非致死がんからの荷重された寄与	30
表 4-17	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の女性宇宙飛行士の 非致死がんからの荷重された寄与	30
表 4-18	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の男性宇宙飛行士の 遺伝的影響からの荷重された寄与	31
表 4-19	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の女性宇宙飛行士の 遺伝的影響からの荷重された寄与	31
表 4-20	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の男性宇宙飛行士の総合損害	32
表 4-21	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の女性宇宙飛行士の総合損害	32
表 4-22	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の男性宇宙飛行士の 寄与死亡が生じたときの損失期間	33
表 4-23	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の女性宇宙飛行士の 寄与死亡が生じたときの損失期間	33
表 4-24	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の男性宇宙飛行士の 被曝時年齢における平均余命の平均損失	34
表 4-25	1 年間のミッションを 3 年間隔で 3 回行った場合の女性宇宙飛行士の 被曝時年齢における平均余命の平均損失	34
表 4-26	宇宙ステーション宇宙飛行士の生涯線量限度(案)	28
表 4-27	最大想定リスク計算結果	35
表 5-1	X 線または γ 線の通常分割治療照射における患者の反応に基づいた、 いろいろな組織の臨床的に有害な確定的影響のおよその推定しきい線量	37
表 5-2	成人の精巣、卵巣、水晶体、骨髄及び皮膚における確定的影響のしきい値の推定値	38
表 5-3	陽子、中性子、重イオンの確定的影響の RBE(又は RBE _m)値	40
表 5-4	通常の船内宇宙放射線環境における組織線量当量推定値	46
表 5-5	1972 年規模の太陽フレア時全期間における組織線量当量の推定値	48
表 5-6	船外活動時における組織線量当量の推定値	48
表 5-7	宇宙放射線被曝管理における組織線量限度(案)	49

1. はじめに

国際宇宙ステーション計画が進捗し、平成 10 (1998) 年 11 月には最初の構成要素 (部品) が打ち上げられ、来世紀始めには我が国の宇宙飛行士が滞在する権利が生ずる。

我々有人サポート委員会宇宙放射線被曝管理分科会(表 1-1)は宇宙開発事業団(以下、「事業団」という。)の要請により、国際宇宙ステーションに滞在する本邦宇宙飛行士の放射線被曝管理に関し検討するために平成 9 (1997) 年 5 月に組織され、発足前の準備会及び 8 回の会合を重ね、表 1-2 のような調査検討を行ってきたが、放射線防護に係る重要な部分をなす線量限度についての現段階における調査検討状況をここに公表するものである。

ここで調査検討の状況について説明しておきたい。

事業団の放射線健康管理担当部門が作成した資料をもとに、我々が各々のバックグラウンドから技術的に疑義を質し、漏れている知見を紹介し、あるいは更なる調査を要求し、いわば我々と事業団担当部門との対話形式で調査検討を進めてきたが、その中で我々同士での討議も行ってきた。

その過程において、批判を加えつつ参照した基本文献は国際放射線防護委員会(ICRP)の出版物No. 60¹、及び米国放射線防護測定審議会(NCRP)の報告書No. 98²である。

周知の通り、前者はいわゆる 1990 年勧告であって、国内制度への取り入れについて既に放射線審議会から意見具申³がなされている。地上における放射線防護と宇宙におけるそれが異なる点があることについては十分認識しつつも、その対比において検討する必要があることは論を俟たない。

後者は米国航空宇宙局 (NASA) が基準として用いているガイドラインである。

ICRP60 は、「放射線防護の主たる目的は、放射線被ばくを生ずる有益な行為を不当に制限することなく、ヒトに対する適切な防護基準を作成すること。[15]」と述べている。この「不当に」という語は、価値判断を含んだ概念であり、一方で「線量限度の定義及び選択には社会的な判断が入ってくる。これらの判断は、線量限度はある決まった値としなければならず、他方、容認可能性を計るものさしには不連続性はないことが一つの理由で、難しい。[123]」と述べられている。

すると、線量限度の設定には行為に関する価値判断を行わねばならず、我々自身が有人宇宙開発の意義に関する見解を示さねばならないという考え方もありえよう。

しかし、我々はあえてそれを行わなかった。表 1-1 に示す名簿から明らかなように、我々は永ら

¹ ICRP: Pub.60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, adopted by the Commission on November 1990, Elsevier 1991

² NCRP: Report 98, Guidance on Radiation Received in Space Activities (Recommendation), National Council on Radiation Protection and Measurement, 1989

以下本文及び本報告書において ICRP60、NCRP98 と略し、[]内は関連する項の番号等を示す。

³ 放射線審議会：ICRP1990 年勧告(Pub.60)の国内制度等への取り入れについて(意見具申)、平成 10 年 6 月、<http://www.sta.go.jp/shimon/shingi/houshasen/houkoku3.htm>

く放射線関連諸分野に携わってきたが、宇宙に関する各委員のバックグラウンドは様々であり、この点についての討議は行わなかったが、有人宇宙開発に関する価値観は様々と考えられる。一方、事業団は国際宇宙ステーション計画において参加主体たる日本国政府の協力機関と位置づけられ、かつ日本人宇宙飛行士の雇用者たる当事者である。

従って、本中間報告書は事業団が主体となって調査検討した案で、我々が放射線関連諸分野の視点から容認可ないしは耐容可と考えているものと理解いただきたい。

宇宙開発、放射線防護に携わる、ないしは関心のある国民各位の御意見、御教示等をいただければ幸甚である。

表 1-1 宇宙放射線被曝管理分科会委員名簿

	氏名	所属・役職
分科会長	佐々木 康人	放射線医学総合研究所長 (前 東京大学医学部教授(放射線医学))
委員	安藤 興一	放射線医学総合研究所 第3研究グループ 第1サブグループリーダー
"	岩崎 民子	(財)放射線影響協会 放射線疫学調査センター長
"	草間 朋子	大分県立看護科学大学長 (前 東京大学医学部助教授(放射線健康管理学))
"	河野 毅	理化学研究所 宇宙放射線研究室副主任研究員
"	小佐古 敏荘	東京大学 原子力研究総合センター助教授
"	中村 尚司	東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター教授
"	藤高 和信	放射線医学総合研究所 第3研究グループ 総合研究官
"	馬淵 清彦	(財)放射線影響研究所 疫学部長

() 内に調査・審議開始時の前職を示した。

表 1-2 宇宙放射線被曝管理分科会調査検討状況

回次	期日	議題
準備会		
平 9 (97). 3 .		<ul style="list-style-type: none"> ・ 国際宇宙ステーション計画の現状 ・ 各国の宇宙放射線被曝管理の現状 ・ 宇宙放射線被曝管理に係る宇宙開発事業団の対応状況 ・ 宇宙放射線被曝管理分科会での調査・審議
第 1 回		
平 9 (97). 5 .14		<ul style="list-style-type: none"> ・ 国際宇宙ステーションにおける宇宙放射線環境 ・ 宇宙放射線の人体影響 ・ 米国・ロシアの宇宙放射線被曝限度設定の考え方 ・ 宇宙放射線被曝管理分科会での調査・審議計画
第 2 回		
平 9 (97). 7 .31		<ul style="list-style-type: none"> ・ 実効線量と実効線量当量の違い ・ 宇宙放射線被曝の限度設定を目的としたリスク評価手法の検討
第 3 回		
平 9 (97).11.28		<ul style="list-style-type: none"> ・ 宇宙飛行士の放射線被曝によるリスクの評価 ・ 医療検査による被曝線量
第 4 回		
平 10 (98). 2 .20		<ul style="list-style-type: none"> ・ 確率的影響の考察による宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量限度 ・ 宇宙放射線の生物的影響の特異性 ・ 確定的影響のしきい値および生物効果比(R B E) ・ 確定的影響の有無および組織線量限度
第 5 回		
平 10 (98). 5 .20		<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽フレア時、E V A時の被曝線量評価 ・ 宇宙ステーション宇宙飛行士の組織線量限度 ・ 宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量限度
第 6 回		
平 10 (98). 8 . 7		<ul style="list-style-type: none"> ・ 宇宙ステーション宇宙飛行士の組織線量限度 ・ 宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量限度 ・ 宇宙ステーション搭載予定モニタリング機器と各機関の状況 ・ 宇宙天気予報の現状について
第 7 回		
平 10 (98).11.12		<ul style="list-style-type: none"> ・ 宇宙放射線被曝管理分科会 中間報告について
第 8 回		
平 10 (98).12.17		<ul style="list-style-type: none"> ・ 宇宙放射線被曝管理分科会 中間報告について

2. 宇宙放射線環境

2. 1 船外宇宙放射線環境

宇宙放射線とは、宇宙環境に存在する電離放射線のことをいい、X線や γ 線、および陽子、中性子、電子、 α 線、それより重い粒子などの粒子線からなる。宇宙放射線は、その起源や形態により、次の三つの種類に分類することができる（図 2-1¹参照）。

（1）銀河宇宙線（Galactic Cosmic Rays, GCR）

銀河宇宙線は、太陽系外から飛来する粒子で、超新星爆発等をその起源とし、銀河系内磁場により加速される荷電粒子であるといわれ、自由空間ではほぼ等方的に運動している。図 2-2、2-3 に、代表的な銀河宇宙線モデルである CREME コード²による宇宙ステーション軌道における銀河宇宙線の元素組成および微分エネルギースペクトルをそれぞれ示す。エネルギー範囲は広く、極めて高いエネルギー（ 10^{20} eV 程度）まで及ぶものもあるが、数 100MeV/u から 1GeV/u のエネルギーに粒子数のピークをもつ（図 2-3）。銀河宇宙線全体の約 98%は陽子とそれより重い粒子で、約 2%が電子と陽電子である。He より重い粒子は HZE 粒子（high-Z and high energy particles）と呼ばれ、陽子やそれより重い粒子のうち、約 87%が陽子、約 12%が He で、残り 1%程度が HZE 粒子（図 2-2）である。HZE 粒子の宇宙放射線の中に占める割合は大きくないが、生物学的影響は大きいと予想される。

銀河宇宙線のフラックスは、太陽活動の約 11 年間の周期的な変動に伴い変化し、太陽活動が極小の時期（太陽活動極小期）に最大に、太陽活動が極大の時期（太陽活動極大期）に最小になる。

（2）太陽粒子現象（Solar Particle Event, SPE）

太陽粒子現象（SPE）は、太陽表面の爆発現象（フレア）等に伴い突発的に高エネルギー粒子が放出される現象であり、特に太陽フレアに伴い放出される粒子を太陽フレア粒子と呼ぶ。SPE で太陽から放出される粒子のエネルギースペクトル、フラックス、組成等はフレア毎の規模により異なるため一概にはいえないが、核子あたり MeV～数十 GeV 程度のエネルギーを持ち、陽子が 80～90%、He イオンが 10～20%、それより重い粒子も 1%程度含まれる³。図 2-4 に太陽フレア粒子の代表的なモデルである CREME コードによる国際宇宙ステーション軌道における太陽フレア粒子の陽子成分のフラックスを示す。通常の宇宙環境における 10MeV 以上の陽子フラックスは静止軌道上では、1 個/sec/cm²/sr 以下であるが、SPE により、 $10^3 \sim 10^4$ 個/sec/cm²/sr 程度に増加し、そのレベルが数時間継続した後、それより低いレベルが数日間続く⁴。また、約 11 年間の太陽周期の間に、1 回の SPE の全フラックスが 10^{10} 個/cm² を越えるような大きな現象が 1～3 回発生し、

¹ 藤高和信: 宇宙環境の放射線, 日本原子力学会誌 35:881,1993

² Adams Jr., et. al. : Cosmic Ray Effects on Microelectronics. Part I -The Near-Earth Particle Environment. NRL Memo. Rep. 4506- Pt. I, U.S. Navy, Aug(1981). (Available from DTIC as AD A103 897.) Cosmic Ray Effects on Microelectronics, Part IV

³ 河野毅: 太陽プロトン現象, 通信総合研究所季報, 35(7): 99, 1989

⁴ 富田二三彦: private communication

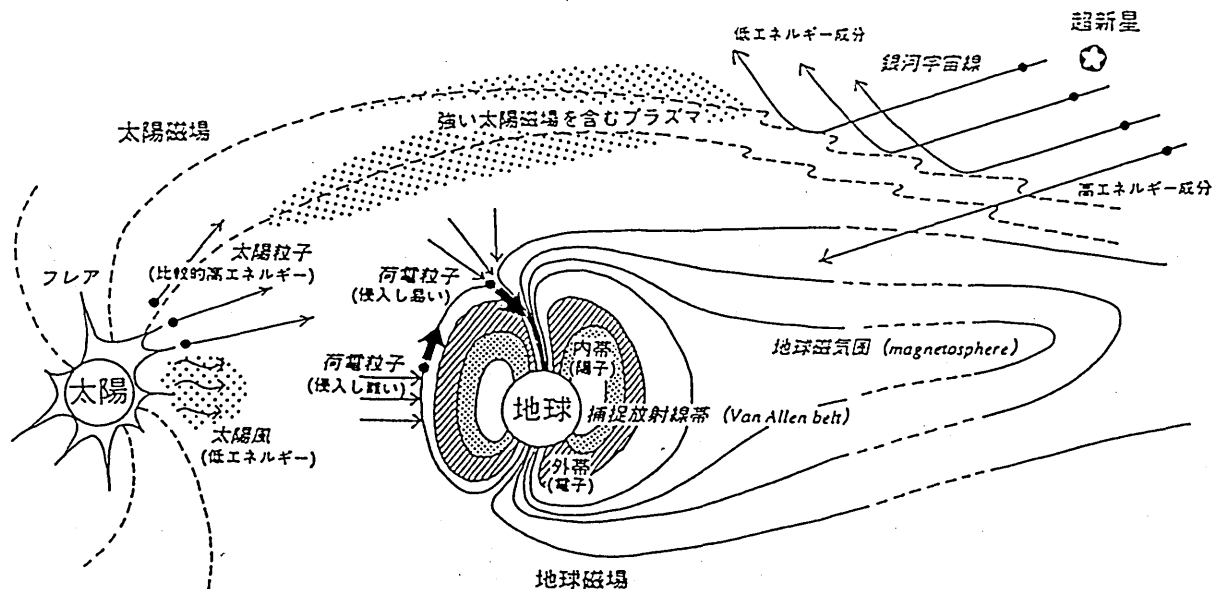


図 2-1 宇宙放射線環境の概略

* 日本原子力学会の許諾を得て転載 (c)1993

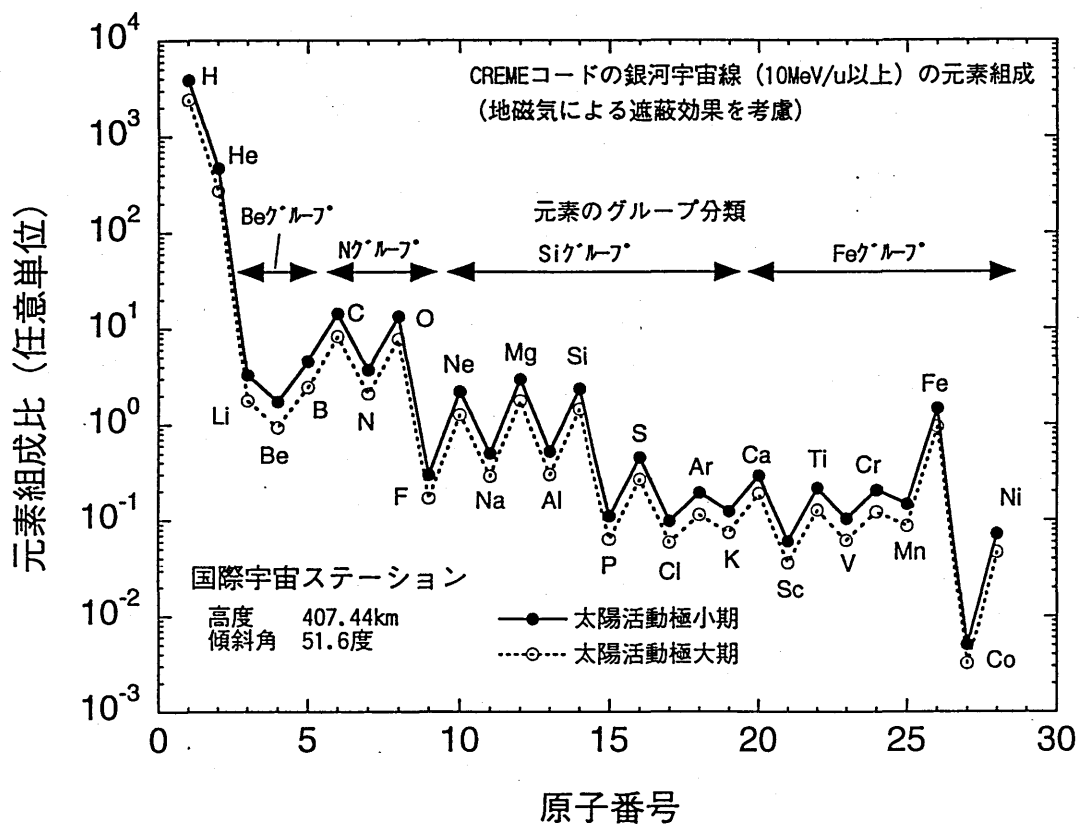


図 2-2 国際宇宙ステーション軌道における銀河宇宙線の元素組成

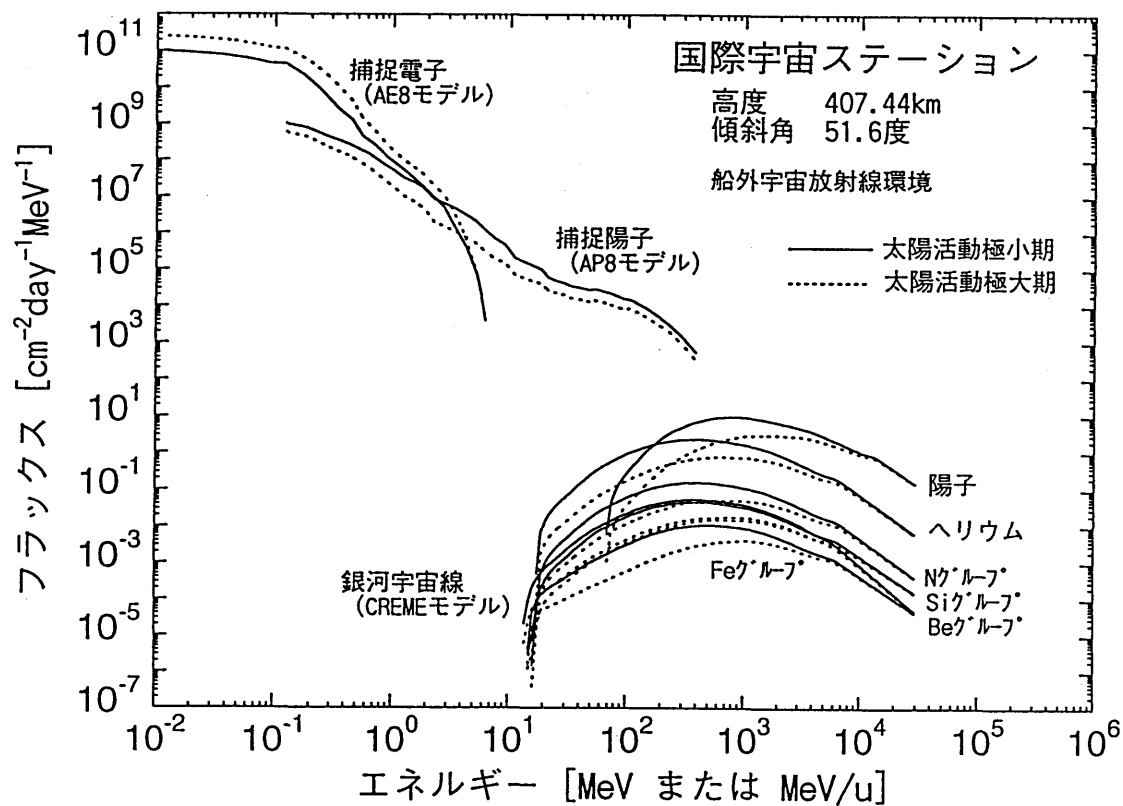


図2-3 国際宇宙ステーション軌道における船外宇宙放射線
エネルギースペクトル推定 (SPE を考慮しない)

(上記図のうち GCR については、 $[\text{MeV/u}]$)

(N-7 grp.等は、図2-2に示す元素の分類によって分けられたそれぞれのグループを示す)

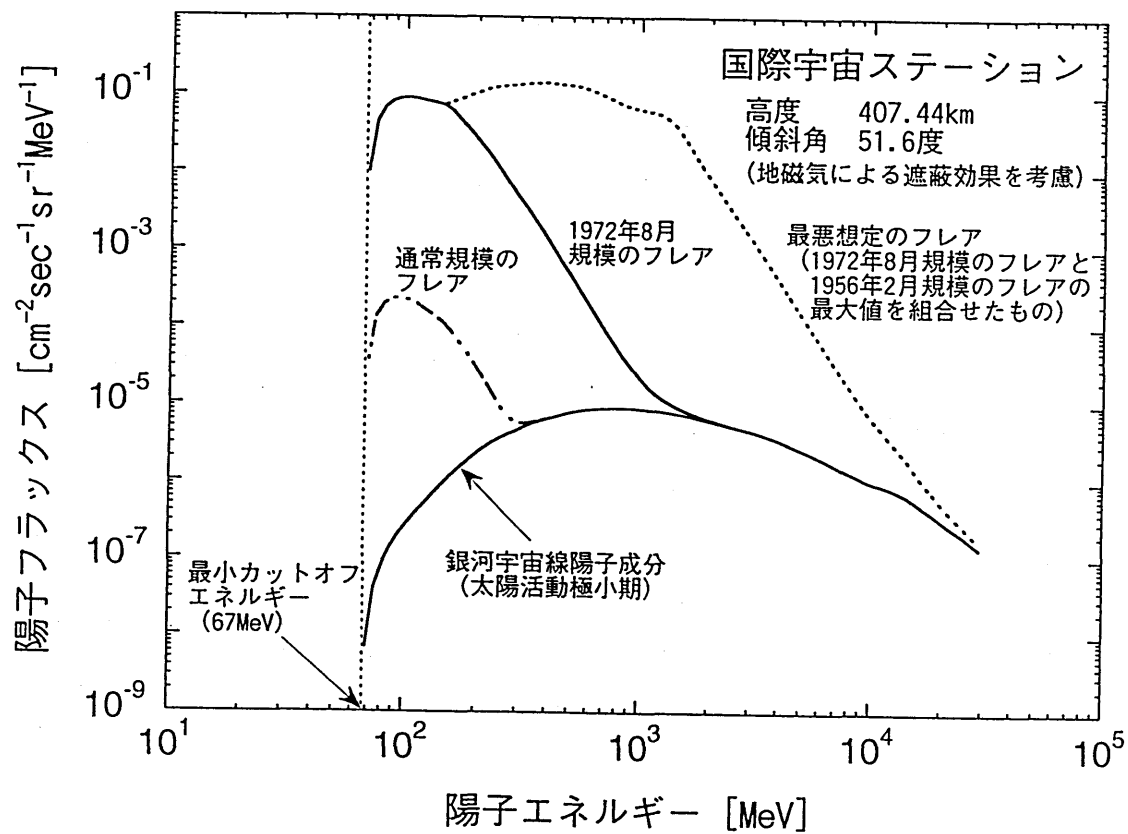


図2-4 国際宇宙ステーション軌道での太陽フレア陽子および銀河宇宙線陽子のエネルギースペクトル推定

10⁹個/cm²以上の現象は5回程度発生するとされている⁴。

(3) 捕捉放射線

捕捉放射線は、地球磁場に捕捉された荷電粒子のことであり、この捕捉放射線のフラックスが高くなっている領域は放射線帯（別名 Van Allen 帯）と呼ばれている。放射線帯は、地磁気軸を中心にドーナツ状に存在しており、電子及び陽子を主成分とする。図 2-5⁵に人工衛星「おおぞら」によって測定された低高度における陽子の強度分布を示す。南大西洋上空で捕捉放射線のフラックスが高くなっている領域があるが、この領域は南大西洋異常（South Atlantic Anomaly, SAA）と呼ばれている。これは、地球磁場を構成する磁気双極子が地球の中心から少しずれたところにあるので、放射線帯の下限高度が場所によって異なり、特にこの領域で他の地域に比べ放射線帯が低軌道にまで及び磁場が弱いことによっている。

図 2-3 に SPE を考慮しない場合の国際宇宙ステーション軌道における船外宇宙放射線環境のエネルギースペクトルの推定値を示す。ここで、使用したモデルを以下に示す。

捕捉陽子： AP 8 モデル⁶

捕捉電子： AE 8 モデル⁷

銀河宇宙線： CREME コード

2. 2 船内宇宙放射線環境

2. 2. 1 船内宇宙放射線環境の推定

2.1 項で示した宇宙ステーション船外での宇宙放射線環境の推定値を基に計算した船内でのエネルギースペクトル推定値を図 2-6～7 に示す。ここで、宇宙ステーションの船壁は

- ・ 船壁がアルミ 9.5mm (2.6g/cm²) の場合
- ・ 船壁がアルミ 67.17mm (パイロード分 60mm 含む 18.1g/cm²) の場合

の 2 つに仮定した。また、船外宇宙放射線環境が、アルミ平板に対して垂直の単一方向から一点で入射すると仮定し、平板透過後のあらゆる方向に飛散する全粒子数を放射線の種類ごとに求めた。なお、透過計算には、以下に示す輸送計算コードを用いて行ない、太陽フレアは 1972 年 8 月規模のフレアを想定して計算を行った。

捕捉陽子（二次中性子、二次光子含む）： HERMES コード⁸

⁵ Kohno, T., et. al.: Intensity Maps of MeV Electrons and Protons Below the Radiation Belt, Planet Space Sci., 38:483, 1990

⁶ Sawyer, D.M., Vette, J.I.: AP-8 Trapped Proton Environment, NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976

⁷ Vette, J.I.: The AE-8 Trapped Electron Model Environment, NASA-WDC-A-R&S 91-24, 1991

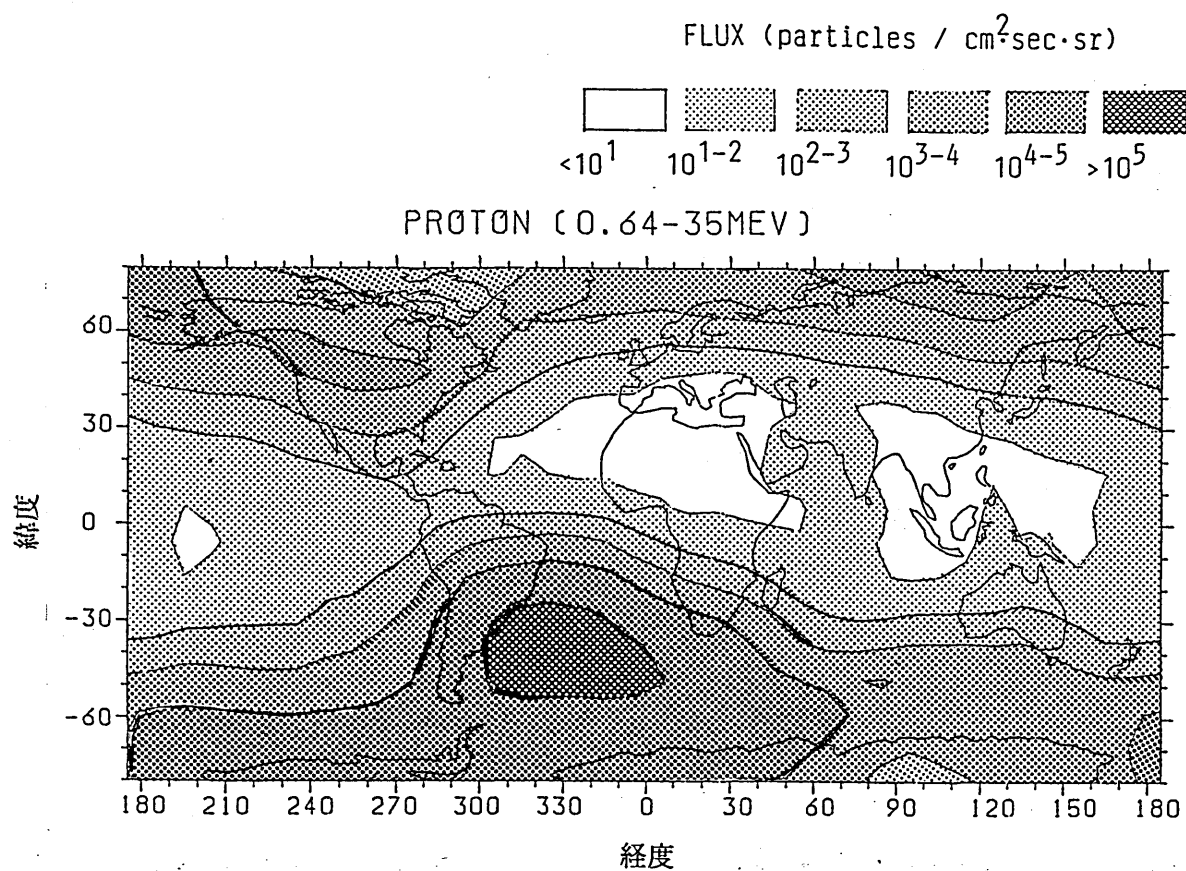


図2-5 人工衛星「おおぞら」による低高度(500-700km)における陽子強度分布

*Pergamon Press の許諾を得て転載 (c)1990

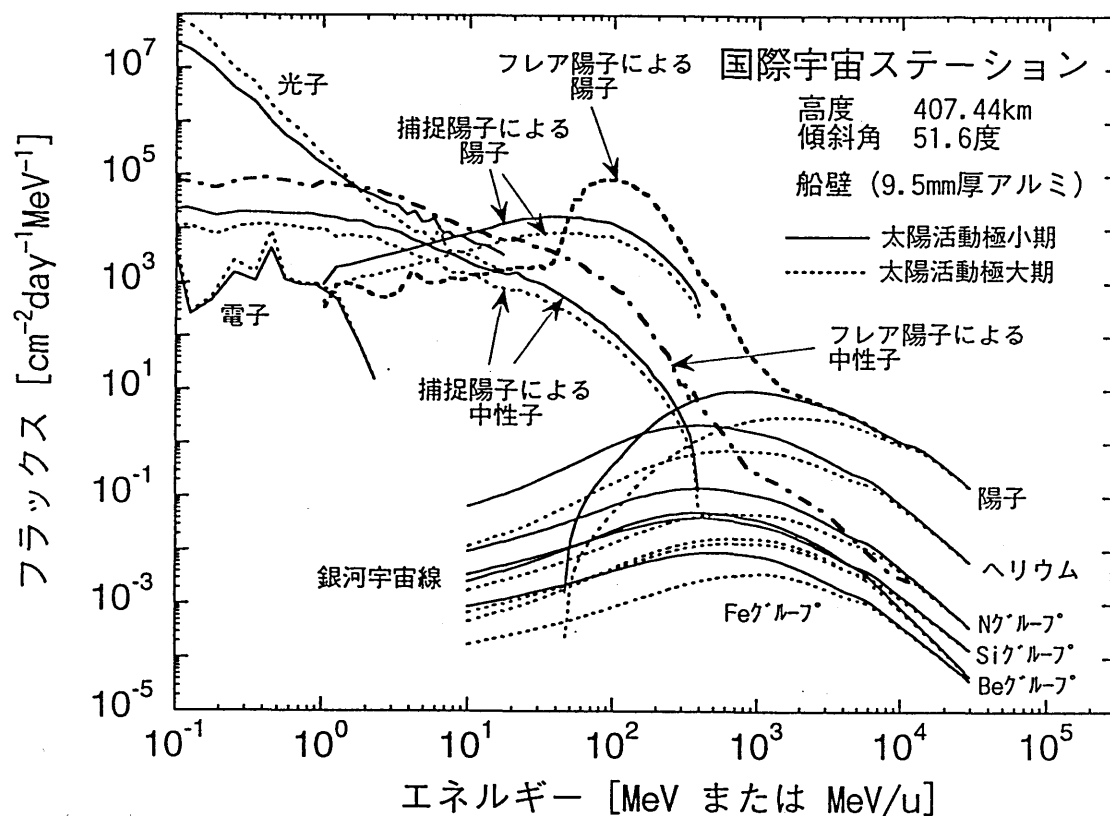


図 2-6 国際宇宙ステーション軌道における船内宇宙放射線
エネルギースペクトル推定 (船壁 9.5mm)

(上記図のうち GCR については、[MeV/u])

(N-7 grp.等は、図 2-2 に示す元素の分類によって分けられたそれぞれのグループを示す)

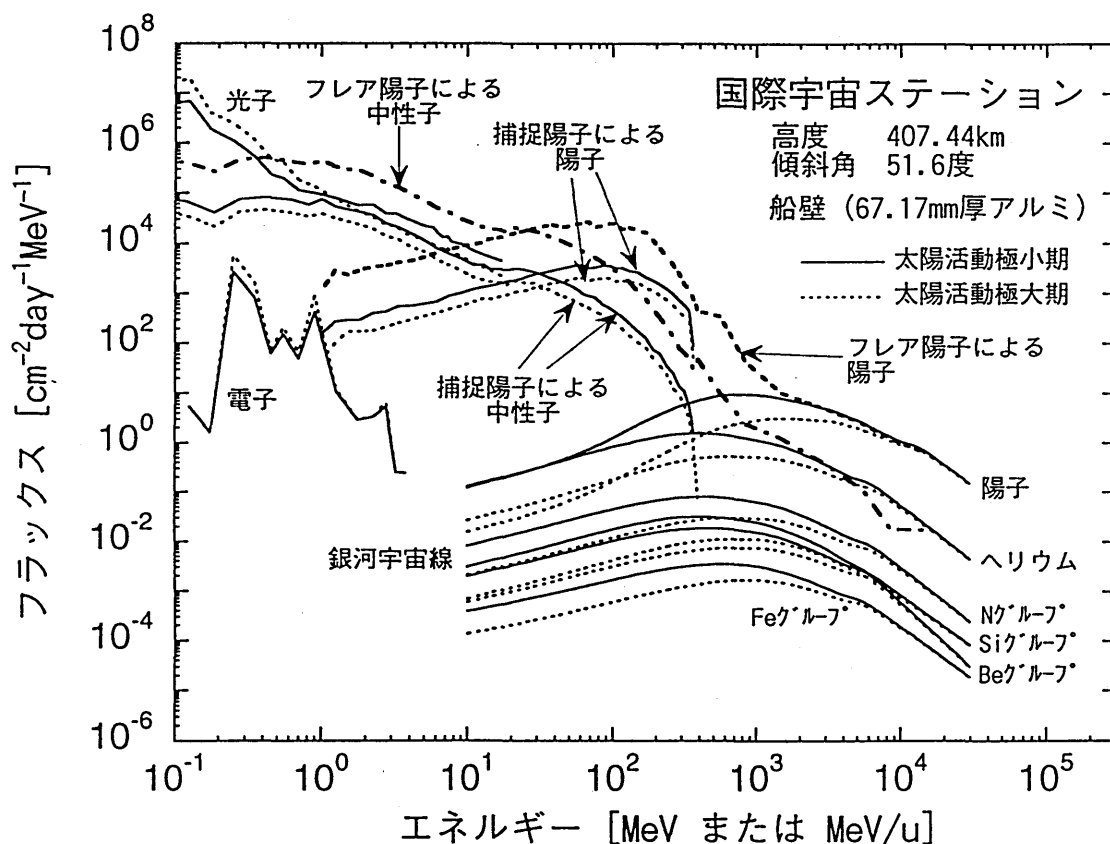


図 2-7 国際宇宙ステーション軌道における船内宇宙放射線
エネルギースペクトル推定 (船壁 67.17mm)

(上記図のうち GCR については、[MeV/u])

(N-7 grp.等は、図 2-2 に示す元素の分類によって分けられたそれぞれのグループを示す)

捕捉電子（二次光子含む）：	EGS4コード ⁹
銀河宇宙線（一次元、一次粒子のみ）：	CREMEコード
太陽フレア粒子（二次中性子を含む）：	HERMESコード

2. 2. 2 船内宇宙放射線環境の測定

図 2-8¹⁰に、スペースシャトル内に搭載された事業団及び NASA の LET スペクトロメータ（事業団：RRMD (Real-time Radiation Monitoring Device)、NASA：TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter)）によって計測された LET スペクトルを示す。図の RRMD による計測は 1997 年 5 月に打ち上げられた STS-84 で行われ、TEPC による計測は 1997 年 1 月打ち上げられた STS-81 で行われた。両者の計測とも、国際宇宙ステーションと同軌道（高度：約 400km、傾斜角：51.6°）で行われた。宇宙飛行士が滞在する宇宙放射線環境は、幅広い LET 分布を持ち、また、これらの計測から船内環境における平均の線質係数は、1.5～2.5 程度であると算出される¹⁰。

2. 3 宇宙放射線被曝線量

2. 3. 1 宇宙放射線被曝の評価に用いる量

地上における放射線被曝を評価するための量として、ICRP60 は放射線荷重係数 w_R 、組織荷重係数 w_T を用いた「実効線量」を提唱しているが、現状では、 w_R を宇宙放射線にそのまま適用することの疑問と他の宇宙ステーション参加各国の現状との整合性を考慮して、宇宙放射線被曝を評価するために用いる量としては、ICRP60 で示されている線質係数 $Q(L)$ 及び組織荷重係数 w_T を用いた「実効線量当量」が妥当と考えられる。ただし、今後の国内及び国際的な動向に応じて改善していくことが必要である。

実効線量当量は、ICRU レポート 51¹¹より

実効線量当量 (effective dose equivalent) : H_E

$$H_E = \sum_T w_T D_T Q_T, \text{ with } \sum_T w_T = 1$$

$$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \int \int Q(L) D_L dL dm$$

と表すことができる。ここで Q_T は組織・器官 T の平均線質係数、 m_T は組織・器官 T の質量、 D_T は組織・器官 T の平均吸収線量 (mean absorbed dose)、 D_L は LET L の放射線による吸収線量である。

⁸ Panel, R.E.: User's Guide to HETC Code System, Rough Draft, LANL Group X-6, 1985

⁹ Nelton, W.R., et. al.: The EGS4 Code System, SLAC-265, 1985

¹⁰ T. Doke et. al.: private communication, 1998

¹¹ ICRU: Report 51, Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, International Commission on Radiation Units and Measurements, 1993

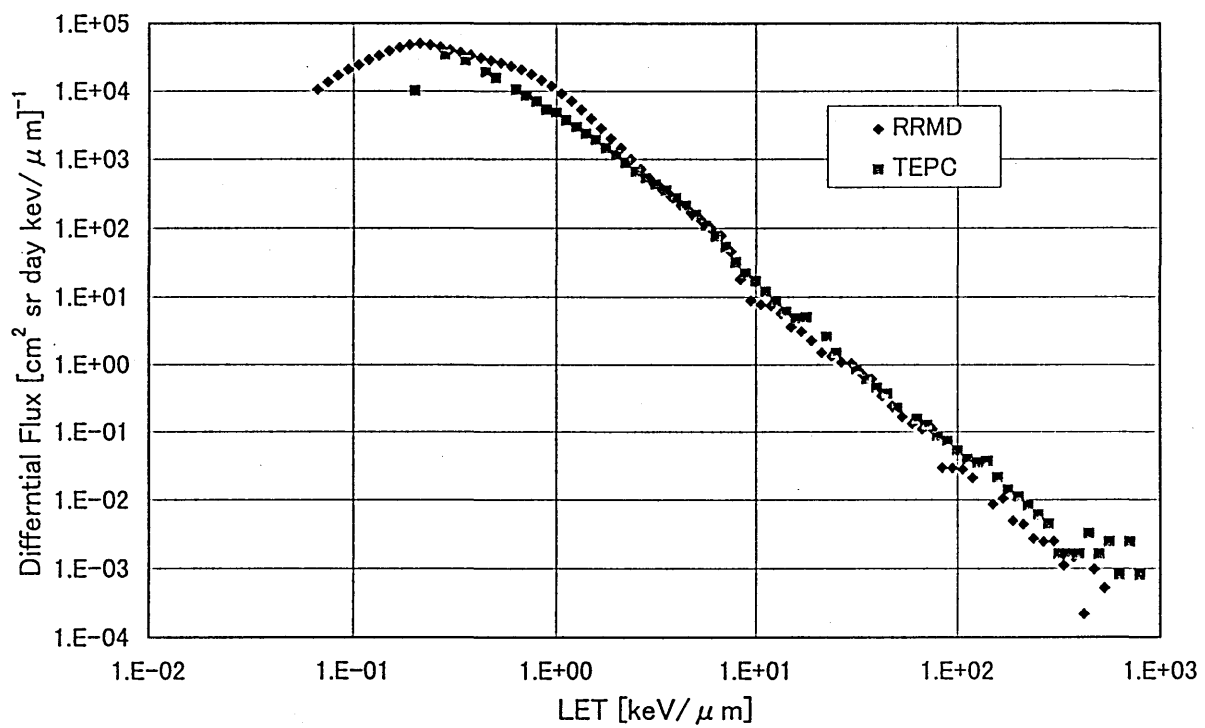


図 2-8 スペースシャトル内で計測されたLETスペクトル
(国際宇宙ステーション軌道)

以下、本報告書において、「実効線量当量」は、ICRP60 で示されている線質係数 $Q(L)$ 及び組織荷重係数 w_T を用いて上記により計算される値を指すこととし、「実効線量」は ICRP60 で定義されている通り、放射線荷重係数 w_R 、組織荷重係数 w_T を用いて計算される値を指すこととする。また、同様に、「線量当量」は ICRP60 の線質係数 $Q(L)$ を用いて計算される値を指し、「等価線量」は w_R を用いて計算される値を指すものとする。

2. 3. 2 宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定

上記に基づき、宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量の推定を行った。推定にあたって、船内の放射線強度は 2.2 項で示したモデルによる値を用いた。組織・器官毎の吸収線量は人体数学ファントム (MIRD-5 ファントム改良型) を使い、二次粒子による寄与も考慮し各組織・器官に沈着するエネルギーをモンテカルロ法計算コード (HERMES コード) により求めた。また、組織の平均の線質係数は荷電粒子のエネルギーと LET との関係を計算コード (SPAR¹²、STOPPING¹³) により求めた。なお、非荷電粒子 (中性子、光子など) による寄与はその二次粒子として発生した荷電粒子による寄与により計算した。

計算により得られた実効線量当量並びに骨髓、精巣、卵巣、水晶体および皮膚のそれぞれの組織線量当量を表 2-1 に示す。

表 2-1 宇宙ステーション軌道での種々のケースにおける被曝線量推定値

		実効線量当量		骨髓		精巣		卵巣		水晶体		皮膚	
船壁厚アルミ (mm)		67.17	9.5	67.17	9.5	67.17	9.5	67.17	9.5	67.17	9.5	67.17	9.5
通常時 (mSv/day)	極大期	0.68	1.5	0.47	1.3	0.52	1.5	0.31	0.58	0.54	1.6	0.56	1.7
	極小期	1.2	2.6	0.8	2.2	0.89	2.8	0.51	0.96	0.91	2.8	0.95	3.1
太陽フレア時 (mSv)		5.2	12	3.9~ 5.4	9.3~ 14	2.5~ 8.0	5.9~ 18	2.4~ 2.5	5.7	3.0~ 8.2	7.5~ 17	6.0~ 6.1	13
アルミ厚 (g/cm ²)		0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2	0.5	0.2
EVA 時 (mSv/day)	極大期	1.7	2.0	1.3~ 1.8	1.5~ 1.9	0.6~ 3.5	0.67 ~4.1	0.41 ~ 0.66	0.43 ~ 0.67	0.79 ~3.3	0.80 ~3.7	5.0	14
	極小期	3.0	3.3	2.3~ 3.4	2.4~ 3.6	1.1~ 6.5	1.1~ 7.1	1.1	1.1	1.3~ 6.4	1.3~ 7.1	5.6	10

- 注) ・通常時は前方照射、後方照射の平均値
 ・太陽フレア時、船外活動 (EVA) 時は前方照射、後方照射のそれぞれを計算し、最小～最大として示した。
 ・「太陽フレア時」は、太陽フレア粒子のみによる太陽フレア全期間中の線量

¹² T. W. Armstrong and K.C. Chandler: "SPAR. a FORTRAN program for computing stopping powers and ranges for muons, charged pions, protons, and heavy ions" ORNL-4869, 1973

¹³ J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark: THE STOPPING AND RANGE OF IONS IN SOLIDS, Volume 1 of the Stopping and Ranges of Ions in Matter. Pergamon Press, 1985

2. 3. 2. 1 通常時の線量の推定

表 2-2 に宇宙開発事業団および NASA によりスペースシャトルに搭載された LET スペクトロメータで得られた計測結果を示す。これらの計測は、国際宇宙ステーションと同軌道（軌道傾斜角：51.6°、高度：約 400km）で、太陽フレア等 SPE のない宇宙放射線環境のスペースシャトル船内で行われた。

表 2-1 のモデルによる計算結果との比較により、国際宇宙ステーションの船内では通常の宇宙放射線環境の船内においては、1 日あたりおよそ 1mSv 程度の線量を被曝することが推定される。

表 2-2 スペースシャトルでの宇宙放射線線量計測

ミッション名	打上げ日	期間	検出器	線量
S/MM-5 (STS-81)	1/12/1997	10 日	TEPC	0.90mSv/day ¹⁴
S/MM-6 (STS-84)	3/15/1997	9 日	RRMD III	1.0mSv/day ¹⁰
S/MM-9 (STS-91)	6/2/1998	9 日	TEPC	1.2mSv/day ¹⁵
			RRMD III	0.82mSv/day ¹⁰

- 注) ・ TEPC : Tissue Equivalent Proportional Counter (NASA 計測器)
・ RRMD III : Real-time Radiation Monitoring Device III 型(事業団計測器)
・ S/MM : Shuttle/Mir Mission (スペースシャトルとミールのドッキングミッション)
・ 検出器の設置場所：すべてスペースハブ内

2. 3. 2. 2 太陽フレア時の線量の推定

図 2-9¹⁶に、1989 年 10 月に起こった巨大太陽フレア時に、国際宇宙ステーションと同軌道であるロシアの MIR 内で測定された積算線量の推移を示す。MIR 船内に設置されている環境モニタ (R-16) の線量の推移から 1 回の太陽フレアにより 20~40mSv 程度の線量になったことが示唆されている。

また、表 2-1 のモデルによる計算は、1972 年 8 月規模の太陽フレア時の線量を推定したものであるが、モデルによる計算は、地球磁場の擾乱による影響を考慮していない等の理由により、実際の線量より小さい値が示されていることも考えられる。

これらのことから、太陽フレア等 SPE 時には、その規模により通常時の十数倍~数十倍程度の線量を被曝する場合もあることが推定される。

¹⁴ G. D. Badhwar, et. al.: Rad. Res. 149:209-218, 1998

¹⁵ G. D. Badhwar: private communication

¹⁶ V.V. Benghin et. al.: Dosimetric Control on Board the MIR Space Station During the Solar Proton Events of Sep. - Oct. 1989, Nucl. Tracks Radiat. Meas., vol. 20, No.1, pp.21-23, 1992

2. 3. 2. 3 船外活動 (EVA) 時の線量の推定

表 2-1 に、国際宇宙ステーション軌道での船外活動 (EVA) 時の線量を示す。宇宙服は文献¹⁷に記載されている次の二つの厚さを仮定して計算を行った。

- ・ 0.2g/cm² 厚のアルミニウムの半無限平板
- ・ 0.5g/cm² 厚のアルミニウムの半無限平板

宇宙服は遮蔽が薄いため 20MeV 以上の陽子はほとんど減衰されず発生した 2 次粒子もほとんど減衰しない。一方電子は遮蔽体の等価厚が厚くなるとともに、遮蔽体中で発生する制動放射線が多くなりこれは減衰せずそのまま透過するため、粒子フラックスとしては電子、光子 (制動放射線) が多くなる。

このため、実効線量当量の値も船内の数倍程度大きくなるとともに、体表に比較的近い組織・臓器の線量が相対的に増えることが推定される。

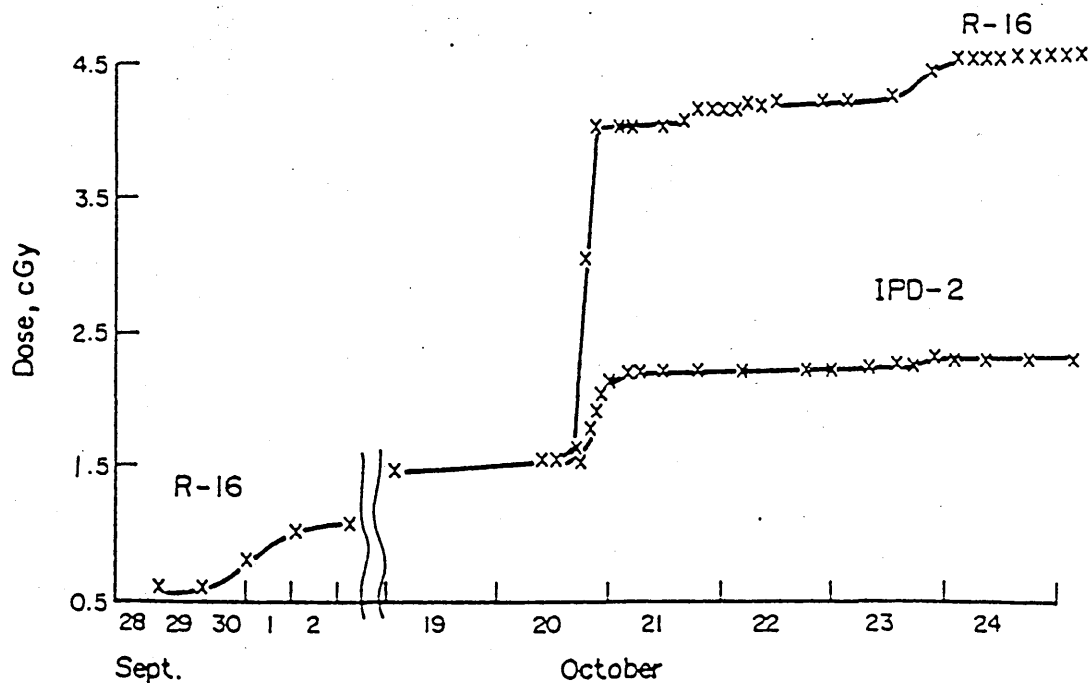


図 2-9 1989 年 10 月の太陽フレア時に、ロシアの MIR 内で計測された積算線量の推移 (R-16: 環境モニタ、IPD-2: 個人モニタ)

* Pergamon Press の許諾を得て転載 (一部改変) (c)1992

¹⁷ P.D. McCormack, et. al.: Radiation Exposure Issues, in "Space Physiology and Medicine, 2nd edition" Lea & Febiger, Philadelphia/London, 328-348, 1989

3. 宇宙放射線被曝の人体影響

NCRP98 は宇宙放射線による人体影響について、要約[1.5~1.8]で次のように分類している。

- ① 急性影響
- ② がんによるリスク
- ③ 遺伝的影響
- ④ 非確率的晩発影響

本報告書では、②及び③、すなわち確率的影響については4.、①及び④、すなわち確定的影響については5.で扱うこととし、HZE 粒子による影響及び微小重力との相互作用について、(1)、(2)にまとめる。

すなわち、HZE 粒子の影響については、破碎片及び δ 線による影響は考慮する必要があると考えられるが、微小損傷についてはNCRP98 も「微小損傷の考え方をいなくとも、HZE 粒子の飛跡の大部分の生物学的影響を説明できるようである。」[5.1.6.4]としており、その考え方をいいて線量を評価するには、今後の知見を待つべきと考えられる。

また、微小重力の放射線影響に及ぼす作用については、限られた軌道上実験の結果等からではあるが、促進、抑制の両面の実験結果が得られており、これを宇宙放射線健康管理にあたり考慮するにはさらなる知見の集積に待つところが多い。

(1)HZE 粒子の生物学的影響

HZE 粒子による放射線影響の特異な点は次のようなものである。

(i) Fragmentation の影響

HZE 粒子は標的核と衝突した際に破砕し (Fragmentation)、その破碎片による被曝も考慮にいれなければならない。

(ii) δ 線の影響

HZE 粒子では、原子との相互作用により生じる電子 (δ 線) が高エネルギーで多数生じるため、ベナンプラと呼ばれる電離領域が飛跡の周りに生じ、飛跡に沿って広範囲の被曝が起きる。

(iii) 微小損傷 (Microlesion)

上記の広範囲な電離により、HZE 粒子に照射された生体組織では、死滅した細胞の周辺を変異を起こした細胞が取り囲むという状況が生じる。これは微小損傷 (Microlesion) と呼ばれ、例えば神経組織などでは、小線量でも確率的な影響では考慮できない障害を引き起こす可能性がある。

(iv) 眼への影響

宇宙飛行士が眼に光を感じることは、アポロ計画以来報告されている。これは高エネルギー粒子等が眼に入射したためであると考えられている。

放射線による眼の白内障は HZE 粒子以外でも生じ、HZE 粒子等の眼の白内障に対する生物効果比 (RBE) については、5.2 項にて検討する。

(2) 微小重力との相互作用

表 3-1 にまとめる。

表 3-1. 微小重力と放射線の生物学的影響の関係に関する研究例

測定対象	放射線源	被曝線量	高度 (軌道 傾斜角)	被曝期間	重力と放射線の相互作用	研究機関等	文献
キイロ ショウジョウバエ	宇宙放射線	低LET:1.1mGy 高LET:0.5mSv	軌道上 平均300km (57°)	8日	伴性劣性致死突然変異頻度 が自然突然変異よりも2～ 3倍高い	京大 放生研 STS-47 (1992)	(1)
放射線耐性菌 (<i>Deinococcus radiodurans</i>)	Co-60 γ 線 (搭載2週間前 に照射)	12kGy	軌道上 300km (28.5°)	—	放射線損傷からの回復が、地 上対照群に較べて顕著に増 加	原研 STS-65 (IML-2) (1994)	(2)
セントポーリア 種子:2500粒	宇宙放射線		軌道上 470 ～340km	軌道上 滞在期間 6年	通常は発芽に2～3週間を要 する種子が8日間で発芽(発 芽期間の短縮)	米国	(3)
ナナフシ類の卵	宇宙放射線	— (生物試料を 飛跡検出器の 間に挟んだ装 置を用いて HZE粒子の単 一ヒットを検 出し、試料へ の放射線照射 の有無を区別 している。)	軌道上	7日間 (微小重力下及び 1g人工重力下)	1. 微小重力の影響は、孵化 率、成長速度、異常の発 生頻度のそれぞれに観ら れた。 2. 微小重力下で HZE 粒子の ヒットを受けた卵で異常 な幼虫の発生が、1g 重力 下に比べて著しく増加し た。	ドイツ SpaceLab DI	(4)
ラット 30匹	軌道上での 照射実験	800rad	軌道上	22日間の飛行 飛行第10日目 に照射	1. 骨格の無機物質における 灰分とリン含量の減少 2. 26日後においてもリン含 量が9%減少	ソ連 COSMOS 690	(5)
ゴミシダマシ科 の甲虫	γ 線(Cs-137), X線 地上での 照射実験	～3650rad	地上		重力補正条件下で卵から発 育した甲虫は、放射線や温 度、湿度等の環境要因感受性 が比較的強い	LBL	(6)

- (1) Ikenaga M, Yoshikawa I, Kojo M, Ayaki T, Ryo H, Ishizaki K, Kato T, Yamamoto H, Hara R: Mutations induced in *Drosophila* during space flight, Biol. Sci. Space, 11:346-350, 1997
- (2) Kobayashi Y, Kikuchi T, Nagaoka S, Watanabe H: Recovery of *Deinococcus radiodurans* from radiation damage was enhanced under microgravity, Biological Science in Space, 10(2):97-101, 1996
- (3) Kuack D.L., Effects of space travel on African violets, Greenhouse Grow 8(5):88, 1990
- (4) Bucker H, Facius R, Horneck G, Reitz G, Graul E.H, Berger H, Hoffken H, Ruther W, Heinrich W, Beaujean R, Enge W, Embryogenesis and organogenesis of *Crausius morosus* under spaceflight conditions, Adv. Space Res., 6(12):115-124, 1986
- (5) A.A.Πoxoh Ч ykob et al., Radiobiologiya 19(5) 760, 1979 (in Russian)
- (6) Yang C et al: Effects of weightlessness, gravity compensation and radiation on the flour beetle, *Tribolium confusum*, LBL-4702, 1973

4. 確率的影響の評価

4. 1 確率的影響とその管理

放射線によって影響を受けた体細胞が依然として再生能力を保持する場合があります、最終的にがんになるかもしれない変化した細胞のクローンを生ずることがある。

また、影響を受けた生殖細胞が、間違った遺伝情報を伝えて子孫の一部に重大な障害を引き起こすことがある。

このように1個の変化した細胞から始まることのあるこれらの身体的影響(がん)及び遺伝的影響を、確率的影響と呼ぶ。 ICRP60[45]

確率的影響の発生率と線量の関係は、ほとんどの生物系において線形-二次($E = \alpha D + \beta D^2$)らしく、低線量域では事実上直線である。また、ある線量レベルまではそのような影響が全て修復されるのでなければ、「しきい値」は存在しない。 ICRP60[B55,B24]

その帰結として、確率的影響のリスクを完全にゼロにすることは不可能であり、それを適切に管理するには、ICRPの1990年勧告(ICRP60)でも行っているとおり、放射線被曝によるリスクを可及的定量的に評価し、容認～耐容可能なリスクレベル以下に抑制すべく線量限度を設定し、それを遵守する必要がある。

ICRP60については、本邦においても既に放射線審議会から国内制度への取り入れについての意見具申がなされており、国内法令がこれに準拠して改正されることが想定される。同勧告は、地上の作業員及び一般公衆に係るものであるが、宇宙ステーション滞在における宇宙放射線被曝による確率的影響の防護を検討するにあたり、地上との比較も重要なことと考え、それを容易にする観点から、上記の考え方に沿いICRP60の手法にならうことが妥当と考える。

4. 2 確率的影響のリスク評価に用いる属性とその算定方法

ICRP60においては、広島・長崎の原爆被爆者の追跡調査(～1985)から得られた過剰相対リスク係数($C_{D,A0}$)を自然がん死亡率($q_{0,cancer}(a)$)に乗じて条件付年死亡確率の増加分を求め、それに各年齢初頭に生存している確率 $\prod_{i=A_0}^{a-1} \{1 - q_{D,A_0}(i)\}$ を乗じたものを積分することによって寄与生涯がん死亡確率($R_{D,cancer}$)を算定している²。

¹ 放射線審議会：ICRP1990年勧告(Pub.60)の国内制度等への取り入れについて(意見具申)、平成10年6月、<http://www.sta.go.jp/shimon/shingi/houshasen/houkoku3.htm>

² ICRP60邦訳[C25]では「寄与生涯死亡確率」としているが、その意味をより明確にするため、本報告書においては、「寄与生涯がん死亡確率」と記載することにした。また、記号等は本報告書において独自のものをを用いた。

$$q_{D,A_0}(a) = q_0(a) + C_{D,A_0} \times q_{0,cancer}(a)$$

D : 被曝線量

A_0 : 被曝時年齢, a : 年齢

$q_{D,A_0}(a)$: 全死亡率, $q_0(a)$: 自然死亡率 (全死因)

$q_{0,cancer}(a)$: 自然がん死亡率

C_{D,A_0} : 過剰相対リスク係数

[B78][C20]

$$R_{D,cancer} = \int_{A_0}^{\infty} \prod_{i=A_0}^{a-1} \{1 - q_{D,A_0}(i)\} \times C_{D,A_0} \times q_{0,cancer}(a) da \quad [C23,24,25]$$

また、ICRP60では、表4-1に示す6つの属性を表4-2に示すデータ及び条件の下に算定した上で、各リスク属性を総合的に判断し、容認不可レベルのほんのわずかな下であると合理的にみなされるリスクレベルにより線量限度を決めている。

宇宙ステーション滞在における宇宙放射線被曝による確率的影響のリスク評価においては、上記に沿って行ったが、特に以下の点を考慮した。

(1) 過剰相対リスク係数(C_{D,A_0})、自然がん死亡率($q_{0,cancer}$)、自然死亡率(全死因)・平均余命

ICRP60表C-1(本報告書では表4-2)の過剰相対リスク係数は1985年までの広島・長崎の被爆者寿命調査(LSS-11)³からUNSCEAR88⁴で算出されたものである。その後、1990年までの調査結果(LSS-12)が既に公表されており、新たに約1,200人の死亡データが追加された⁵。

また、自然がん死亡率については平成9年までの人口動態統計⁶、自然死亡率(全死因)・平均余命についてはわが国の平成7年生命表⁷まで使用可能である。

しかし、それら最新のデータを用いるには次のような問題点が考えられることから、ICRP60で使用しているデータを用いることとした。

- ・ICRP60で用いられている過剰相対リスク係数は、一定の評価が得られており、仮に最新のデータを用い、同一の方法で算定しても各界の評価を得るまでには時間を要する。
- ・実効線量当量を算定するための組織荷重係数(ICRP60)が主として1985年のデータによっており、過剰相対リスク係数のみを新たに算出して用いることにより、矛盾が生ずるおそれがある。
- ・自然がん死亡率、自然死亡率(全死因)・平均余命については、過剰相対リスク係数と関連しているため、同年代のデータを使用すべきである。

³ Shimizu Y, Kato H, Shull WJ: Life Span Study Report 11, Part 2, Cancer Mortality in the Years 1950-85 Based on the Recent Revised Doses (DS86), RERF TR 5-88, Radiation Effects Research Foundation, Hiroshima

⁴ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation. Annex F. Radiation Carcinogenesis in Man, E.88.IX.7 United Nations, New York, 1988

⁵ Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, Veath M, Mabuchi K: Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 12, Part I, Cancer: 1950-1990, Rad.Res.146(1)1-27,1996

⁶ <http://www.mhw.go.jp/toukei/toukeihp/9nenppo/mokuji.html>

⁷ <http://www.mhw.go.jp/houdou/0904/h0425-4/h0425-4.html>

表 4-1. 確率的影響のリスク評価に用いる属性と計算方法の概要
(ICRP60 付属書 C 等、[]は項番号等)

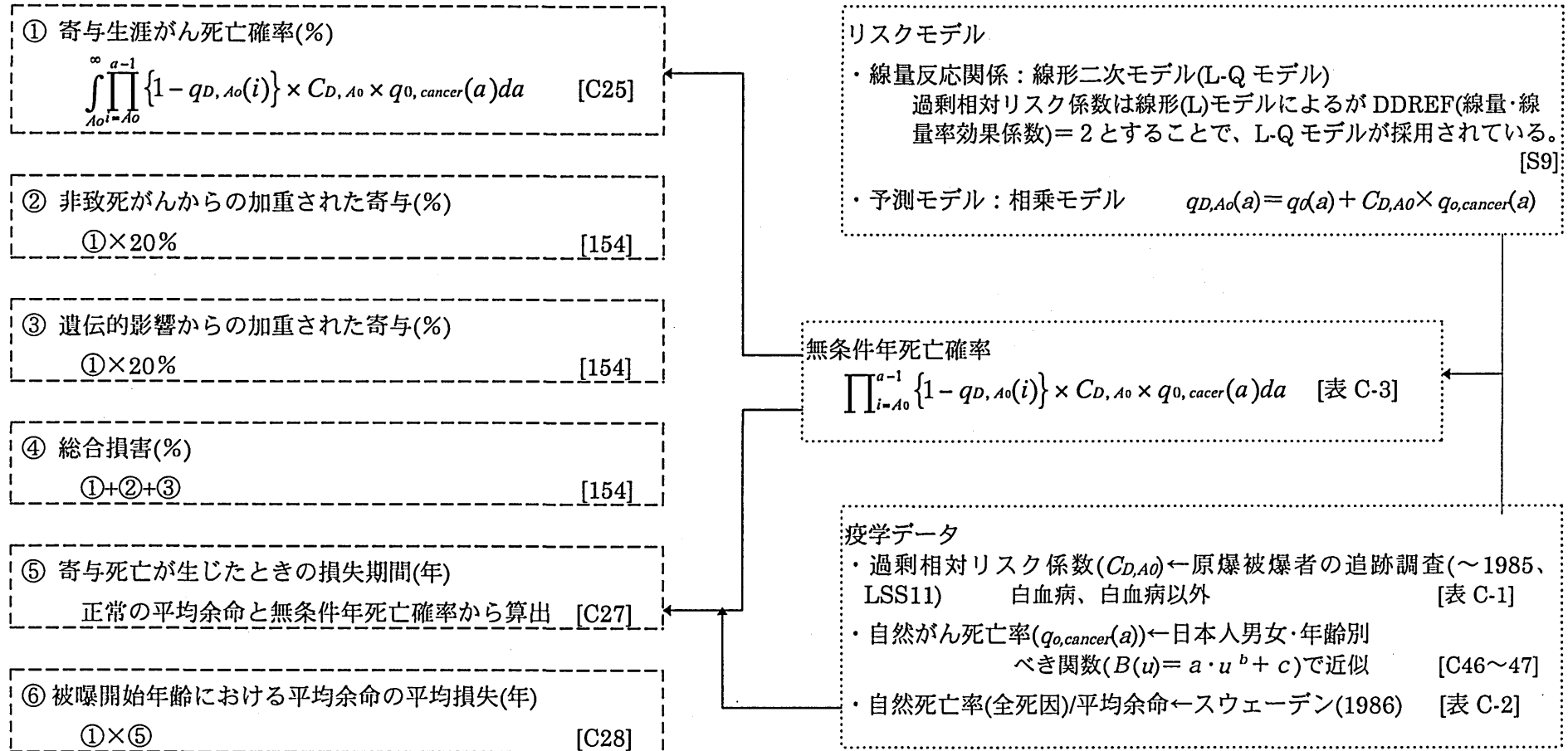


表 4-2. 諸属性の算定条件

項目	データ				
	被曝時年齢 (A_0)(歳)	白血病		白血病以外	
過剰相対リスク係数 (C_{D,A_0}) (相乗モデル ERR/Sv)		男	女	男	女
	0-9	18.7	19.5	1.06	2.06
	10-19	4.4	4.6	0.65	1.27
	20-29	5.6	5.8	0.57	1.11
	30-39	3.9	4.1	0.24	0.48
	40+	3.3	3.4	0.18	0.34
					[表 C-1]
最小潜伏期間	白血病：2年、白血病以外：10年				
					[C42]
プラトー(被曝リスクが現れている期間)	白血病：40年、白血病以外：無限				
					[C42]
自然がん死亡率 ($q_{0,cancer}$)	日本人集団男女別(1986) 下記べき関数で近似 $B(u)=a \cdot u^{b+c}$				
	がんの種類	性別	a	b	c
	白血病	男性	4.4×10^{-10}	3.00	15×10^{-6}
		女性	3.0×10^{-10}	2.90	15×10^{-6}
	白血病以外	男性	$3.0 \times 10^{-12*}$	5.14	15×10^{-6}
		女性	$3.9 \times 10^{-12*}$	4.90	15×10^{-6}
					[C46,47]
自然死亡率(全死因)・平均余命	スウェーデン(1986)				

*) 記載値(指数が 10^{-10})を訂正した値。それを用いると白血病以外の自然がん死亡率が通常の 100 倍程度になる。これについては、下記にも指摘されている。

・ 中村裕二：日本人集団に対する放射線リスク諸量の計算、保健物理 28:47-61,1993

(2) 宇宙ステーション滞在条件 (被曝条件)

ICRP60 は全ての作業年に年線量限度の試行値を被曝する場合の算定を行っている。

一方、宇宙飛行士の宇宙ステーション滞在様式は、1 回の長期滞在後にはリハビリテーションおよび次回ミッションへの訓練等があり、長期滞在は数年に 1 回と考えられ、また宇宙飛行士としての担務期間は最低 10 年間程度が考えられることから、表 4-3 に示す種々の被曝条件で算定を行った。

表 4-3 確率的影響のリスク評価に係る属性の算定に用いた宇宙ステーション滞在条件 (被曝条件)

条件	滞在時年齢	1 回滞在期間	試行線量
1 回	25 歳、35 歳、 45 歳、55 歳	1 年間	100,200,300,500,1000,2000,3000,5000mSv/年
10 年間連続	25 歳～、35 歳～、 45 歳～、55 歳～	10 年間	10,20,50,100,200,300,400,500mSv/年
3 年間隔 3 回	25,28,31 歳 35,38,41 歳 45,48,51 歳	1 年間	20,50,100,200,300,400,500mSv/年
3 年間隔 5 回	25,28,31,34,37 歳 35,38,41,44,47 歳 45,48,51,54,57 歳	1 年間	20,50,100,200,300,400,500mSv/年

(3) 平均余命の平均損失

ICRP60 は作業年を 18～65 歳と仮定し、平均余命の平均損失についても、その始期 18 歳時で算定している。

一方、宇宙飛行士は、(2)宇宙ステーション滞在条件に示したとおり、その作業年はまちまちであるため、平均余命の平均損失については、被曝開始年齢時で算定を行った。

上記によるリスク属性算定結果を表 4-4～4-11 に示す。

これらの結果から、同じリスクレベルでもその宇宙ステーション滞在条件により、1 年間の線量はもとより、その総和である生涯に受ける線量も異なることが分かる。

4. 3 「容認～耐容可能」のリスクレベル

NCRP98、ICRP60 は次のような考え方で確率的影響のリスク評価を行っている。

(1)NCRP

宇宙放射線の防護に係り、NCRP98 は NIH ワーキンググループが作成した放射線疫学表⁸、SEER プログラム⁹から得られたデータ等を用いて寄与生涯がん死亡確率を推定している。 [5.4.4～5.4.5]

その上で、地上における職業的死亡事故との比較の困難性を指摘しつつ、“あまり安全でない”安全性中位の職業と比較し、宇宙飛行士に「容認～耐容可能」のリスクレベルを、男性の致死がんの自然リスクの 1/5 であり、女性の致死がんの自然リスクの 1/6 である寄与生涯がん死亡確率 3 %とするのが妥当であるとしている。NCRP98 では、これに基づき生涯被曝線量限度(表 4-12)を設定することにより、宇宙飛行士の確率的影響のリスクを管理することが妥当としている。

[1.9, 6.2.1, 6.4.2 6.4.3]

また、広島・長崎の原爆被爆者データの再評価に伴い、現在、それを再検討しているが、NCRP98 で採用した 3%という生涯リスクを維持する方向が示唆されている¹⁰。

⁸ Rall JE et al: Report of the National Institute of Health ad hoc Working Group to Develop Radioepidemiological Tables, USDHHS 1985

⁹ National Cancer Institute: Surveillance, Epidemiology and End Results Program, <http://www-seer.ims.nci.nih.gov/>

¹⁰ Sinclair WK: History of the Development of Radiation Protection Standards for Space Activities, In: Acceptability of Risk from Radiation - Application to Human Space Flight, Symposium Proceedings No3, held May 29, 1996, Arlington, Va., NCRP 1997, pp51-65

表4-4 1回被曝による男性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量													
	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv	600mSv	700mSv	800mSv	900mSv	1000mSv	2000mSv	3000mSv	5000mSv	
寄与生涯がん死亡確率(%)														
25	0.70%	1.38%	2.05%	2.71%	3.35%	3.99%	4.61%	5.22%	5.82%	6.41%	11.79%	16.37%	23.75%	
35	0.33%	0.65%	0.98%	1.30%	1.61%	1.93%	2.24%	2.56%	2.87%	3.17%	6.13%	8.89%	13.91%	
45	0.25%	0.50%	0.75%	0.99%	1.24%	1.48%	1.72%	1.96%	2.20%	2.44%	4.76%	6.96%	11.07%	
55	0.22%	0.44%	0.66%	0.87%	1.09%	1.30%	1.52%	1.73%	1.94%	2.15%	4.20%	6.15%	9.79%	
非致死がんからの荷重された寄与(%)														
25	0.14%	0.28%	0.41%	0.54%	0.67%	0.80%	0.92%	1.04%	1.16%	1.28%	2.36%	3.27%	4.75%	
35	0.07%	0.13%	0.20%	0.26%	0.32%	0.39%	0.45%	0.51%	0.57%	0.63%	1.23%	1.78%	2.78%	
45	0.05%	0.10%	0.15%	0.20%	0.25%	0.30%	0.34%	0.39%	0.44%	0.49%	0.95%	1.39%	2.22%	
55	0.04%	0.09%	0.13%	0.17%	0.22%	0.26%	0.30%	0.35%	0.39%	0.43%	0.84%	1.23%	1.96%	
遺伝的影響からの荷重された寄与(%)														
25	0.14%	0.28%	0.41%	0.54%	0.67%	0.80%	0.92%	1.04%	1.16%	1.28%	2.36%	3.27%	4.75%	
35	0.07%	0.13%	0.20%	0.26%	0.32%	0.39%	0.45%	0.51%	0.57%	0.63%	1.23%	1.78%	2.78%	
45	0.05%	0.10%	0.15%	0.20%	0.25%	0.30%	0.34%	0.39%	0.44%	0.49%	0.95%	1.39%	2.22%	
55	0.04%	0.09%	0.13%	0.17%	0.22%	0.26%	0.30%	0.35%	0.39%	0.43%	0.84%	1.23%	1.96%	
総合損害(%)														
25	0.97%	1.93%	2.87%	3.79%	4.69%	5.58%	6.45%	7.31%	8.15%	8.97%	16.51%	22.91%	33.24%	
35	0.46%	0.91%	1.37%	1.81%	2.26%	2.70%	3.14%	3.58%	4.01%	4.44%	8.58%	12.45%	19.48%	
45	0.35%	0.70%	1.04%	1.39%	1.73%	2.07%	2.41%	2.75%	3.08%	3.42%	6.66%	9.75%	15.50%	
55	0.31%	0.61%	0.92%	1.22%	1.52%	1.82%	2.12%	2.42%	2.71%	3.01%	5.87%	8.61%	13.71%	
寄与死亡が生じたときの損失期間(年)														
25	13.5	13.6	13.6	13.7	13.8	13.8	13.9	13.9	14.0	14.0	14.6	15.1	16.1	
35	13.1	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.3	13.3	13.3	13.3	13.5	13.7	14.1	
45	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.7	11.8	12.0	
55	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.5	9.5	9.5	9.5	9.6	9.8	
被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)														
25	0.09	0.19	0.28	0.37	0.46	0.55	0.64	0.73	0.81	0.90	1.72	2.47	3.82	
35	0.04	0.09	0.13	0.17	0.21	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.83	1.22	1.96	
45	0.03	0.06	0.09	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.28	0.56	0.82	1.33	
55	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.40	0.59	0.96	

表4-5 1回被曝による女性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量													
	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv	600mSv	700mSv	800mSv	900mSv	1000mSv	2000mSv	3000mSv	5000mSv	
	寄与生涯がん死亡確率(%)													
25	0.85%	1.69%	2.50%	3.30%	4.08%	4.85%	5.59%	6.32%	7.04%	7.74%	14.01%	19.16%	27.03%	
35	0.39%	0.77%	1.15%	1.53%	1.91%	2.28%	2.64%	3.01%	3.37%	3.73%	7.14%	10.27%	15.80%	
45	0.28%	0.55%	0.82%	1.09%	1.36%	1.63%	1.89%	2.16%	2.42%	2.68%	5.20%	7.58%	11.95%	
55	0.25%	0.49%	0.74%	0.98%	1.22%	1.46%	1.70%	1.94%	2.18%	2.41%	4.69%	6.85%	10.83%	
	非致死死がんとからの荷重された寄与(%)													
25	0.17%	0.34%	0.50%	0.66%	0.82%	0.97%	1.12%	1.27%	1.41%	1.55%	2.80%	3.83%	5.41%	
35	0.08%	0.15%	0.23%	0.31%	0.38%	0.46%	0.53%	0.60%	0.67%	0.75%	1.43%	2.05%	3.16%	
45	0.06%	0.11%	0.16%	0.22%	0.27%	0.33%	0.38%	0.43%	0.48%	0.54%	1.04%	1.52%	2.39%	
55	0.05%	0.10%	0.15%	0.20%	0.25%	0.29%	0.34%	0.39%	0.44%	0.48%	0.94%	1.37%	2.17%	
	遺伝的影響からの荷重された寄与(%)													
25	0.17%	0.34%	0.50%	0.66%	0.82%	0.97%	1.12%	1.27%	1.41%	1.55%	2.80%	3.83%	5.41%	
35	0.08%	0.15%	0.23%	0.31%	0.38%	0.46%	0.53%	0.60%	0.67%	0.75%	1.43%	2.05%	3.16%	
45	0.06%	0.11%	0.16%	0.22%	0.27%	0.33%	0.38%	0.43%	0.48%	0.54%	1.04%	1.52%	2.39%	
55	0.05%	0.10%	0.15%	0.20%	0.25%	0.29%	0.34%	0.39%	0.44%	0.48%	0.94%	1.37%	2.17%	
	総合損害(%)													
25	1.19%	2.36%	3.50%	4.62%	5.71%	6.78%	7.83%	8.85%	9.86%	10.84%	19.62%	26.82%	37.84%	
35	0.54%	1.08%	1.62%	2.14%	2.67%	3.19%	3.70%	4.21%	4.72%	5.22%	9.99%	14.37%	22.12%	
45	0.39%	0.77%	1.15%	1.53%	1.90%	2.28%	2.65%	3.02%	3.38%	3.75%	7.28%	10.61%	16.73%	
55	0.35%	0.69%	1.03%	1.37%	1.71%	2.05%	2.38%	2.72%	3.05%	3.38%	6.57%	9.59%	15.16%	
	寄与死亡が生じたときの損失期間(年)													
25	14.0	14.1	14.2	14.2	14.3	14.4	14.4	14.5	14.6	14.7	15.3	16.0	17.2	
35	13.6	13.7	13.7	13.7	13.8	13.8	13.8	13.8	13.9	13.9	14.2	14.4	14.9	
45	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.4	12.5	12.7	12.9	
55	10.1	10.1	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3	10.4	10.6	
	被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)													
25	0.12	0.24	0.35	0.47	0.58	0.70	0.81	0.92	1.03	1.13	2.15	3.06	4.66	
35	0.05	0.11	0.16	0.21	0.26	0.31	0.36	0.42	0.47	0.52	1.01	1.48	2.36	
45	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.65	0.96	1.55	
55	0.03	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.25	0.48	0.71	1.15	

表4-6 10年間の長期被曝による男性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量														
	10mSv	20mSv	30mSv	40mSv	50mSv	60mSv	70mSv	80mSv	90mSv	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv	
寄与生涯がん死亡確率(%)															
25	0.51%	1.02%	1.51%	2.00%	2.49%	2.97%	3.44%	3.91%	4.37%	4.83%	9.09%	12.89%	16.30%	19.37%	
35	0.29%	0.58%	0.86%	1.14%	1.43%	1.71%	1.98%	2.26%	2.53%	2.81%	5.45%	7.94%	10.30%	12.53%	
45	0.23%	0.47%	0.70%	0.93%	1.16%	1.39%	1.62%	1.84%	2.07%	2.29%	4.47%	6.54%	8.52%	10.41%	
55	0.19%	0.37%	0.56%	0.74%	0.93%	1.11%	1.29%	1.47%	1.65%	1.83%	3.58%	5.24%	6.84%	8.37%	
非致死がんからの荷重された寄与(%)															
25	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.59%	0.69%	0.78%	0.87%	0.97%	1.82%	2.58%	3.26%	3.87%	
35	0.06%	0.12%	0.17%	0.23%	0.29%	0.34%	0.40%	0.45%	0.51%	0.56%	1.09%	1.59%	2.06%	2.51%	
45	0.05%	0.09%	0.14%	0.19%	0.23%	0.28%	0.32%	0.37%	0.41%	0.46%	0.89%	1.31%	1.70%	2.08%	
55	0.04%	0.08%	0.11%	0.15%	0.19%	0.22%	0.26%	0.29%	0.33%	0.37%	0.72%	1.05%	1.37%	1.67%	
遺伝的影響からの荷重された寄与(%)															
25	0.10%	0.20%	0.30%	0.40%	0.50%	0.59%	0.69%	0.78%	0.87%	0.97%	1.82%	2.58%	3.26%	3.87%	
35	0.06%	0.12%	0.17%	0.23%	0.29%	0.34%	0.40%	0.45%	0.51%	0.56%	1.09%	1.59%	2.06%	2.51%	
45	0.05%	0.09%	0.14%	0.19%	0.23%	0.28%	0.32%	0.37%	0.41%	0.46%	0.89%	1.31%	1.70%	2.08%	
55	0.04%	0.08%	0.11%	0.15%	0.19%	0.22%	0.26%	0.29%	0.33%	0.37%	0.72%	1.05%	1.37%	1.67%	
総合損害(%)															
25	0.72%	1.42%	2.12%	2.81%	3.49%	4.16%	4.82%	5.47%	6.12%	6.76%	12.73%	18.05%	22.82%	27.12%	
35	0.40%	0.81%	1.21%	1.60%	2.00%	2.39%	2.78%	3.16%	3.55%	3.93%	7.63%	11.12%	14.42%	17.54%	
45	0.33%	0.65%	0.98%	1.30%	1.62%	1.94%	2.26%	2.58%	2.89%	3.21%	6.26%	9.16%	11.93%	14.58%	
55	0.26%	0.52%	0.78%	1.04%	1.30%	1.55%	1.81%	2.06%	2.31%	2.56%	5.01%	7.34%	9.58%	11.72%	
寄与死亡が生じたときの損失期間(年)															
25	13.4	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.8	14.2	14.5	14.9	15.2	
35	12.5	12.5	12.5	12.5	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.8	13.0	13.1	13.3	
45	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.7	10.7	10.7	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1	
55	8.4	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.6	8.6	8.7	8.8	
被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)															
25	0.07	0.14	0.20	0.27	0.34	0.40	0.47	0.54	0.60	0.67	1.29	1.87	2.42	2.95	
35	0.04	0.07	0.11	0.14	0.18	0.21	0.25	0.28	0.32	0.35	0.70	1.03	1.35	1.66	
45	0.02	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.22	0.24	0.48	0.71	0.94	1.15	
55	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.31	0.45	0.60	0.73	

表4-7 10年間の長期被曝による女性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量														
	10mSv	20mSv	30mSv	40mSv	50mSv	60mSv	70mSv	80mSv	90mSv	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv	
	寄与生涯がん死亡確率(%)														
25	0.62%	1.23%	1.83%	2.42%	3.01%	3.58%	4.15%	4.70%	5.25%	5.79%	10.77%	15.09%	18.85%	22.16%	
35	0.33%	0.66%	0.99%	1.31%	1.63%	1.95%	2.27%	2.59%	2.90%	3.21%	6.19%	8.95%	11.54%	13.95%	
45	0.26%	0.52%	0.78%	1.04%	1.30%	1.55%	1.81%	2.06%	2.31%	2.56%	4.97%	7.24%	9.40%	11.44%	
55	0.22%	0.44%	0.65%	0.87%	1.08%	1.29%	1.50%	1.71%	1.92%	2.13%	4.15%	6.06%	7.88%	9.61%	
	非致死がんからの荷重された寄与(%)														
25	0.12%	0.25%	0.37%	0.49%	0.60%	0.72%	0.83%	0.94%	1.05%	1.16%	2.16%	3.02%	3.77%	4.43%	
35	0.07%	0.13%	0.20%	0.26%	0.33%	0.39%	0.45%	0.52%	0.58%	0.64%	1.24%	1.79%	2.31%	2.79%	
45	0.05%	0.11%	0.16%	0.21%	0.26%	0.31%	0.36%	0.41%	0.46%	0.51%	0.99%	1.45%	1.88%	2.29%	
55	0.04%	0.09%	0.13%	0.17%	0.22%	0.26%	0.30%	0.34%	0.38%	0.43%	0.83%	1.21%	1.58%	1.92%	
	遺伝的影響からの荷重された寄与(%)														
25	0.12%	0.25%	0.37%	0.49%	0.60%	0.72%	0.83%	0.94%	1.05%	1.16%	2.16%	3.02%	3.77%	4.43%	
35	0.07%	0.13%	0.20%	0.26%	0.33%	0.39%	0.45%	0.52%	0.58%	0.64%	1.24%	1.79%	2.31%	2.79%	
45	0.05%	0.11%	0.16%	0.21%	0.26%	0.31%	0.36%	0.41%	0.46%	0.51%	0.99%	1.45%	1.88%	2.29%	
55	0.04%	0.09%	0.13%	0.17%	0.22%	0.26%	0.30%	0.34%	0.38%	0.43%	0.83%	1.21%	1.58%	1.92%	
	総合損害(%)														
25	0.87%	1.72%	2.57%	3.39%	4.21%	5.01%	5.81%	6.58%	7.35%	8.11%	15.08%	21.12%	26.39%	31.02%	
35	0.46%	0.93%	1.38%	1.84%	2.29%	2.74%	3.18%	3.62%	4.06%	4.49%	8.66%	12.54%	16.15%	19.52%	
45	0.37%	0.73%	1.10%	1.46%	1.82%	2.17%	2.53%	2.88%	3.23%	3.58%	6.95%	10.14%	13.15%	16.01%	
55	0.31%	0.61%	0.91%	1.21%	1.51%	1.81%	2.10%	2.40%	2.69%	2.98%	5.81%	8.49%	11.03%	13.46%	
	寄与死亡が生じたときの損失期間(年)														
25	13.9	14.0	14.0	14.1	14.1	14.2	14.2	14.3	14.3	14.4	14.8	15.3	15.8	16.2	
35	13.1	13.1	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.3	13.3	13.3	13.5	13.7	13.9	14.1	
45	11.3	11.3	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.6	11.7	11.8	12.0	
55	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.3	9.4	9.4	9.5	
	被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)														
25	0.09	0.17	0.26	0.34	0.42	0.51	0.59	0.67	0.75	0.83	1.60	2.31	2.97	3.59	
35	0.04	0.09	0.13	0.17	0.22	0.26	0.30	0.34	0.39	0.43	0.84	1.23	1.61	1.97	
45	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.23	0.26	0.29	0.57	0.85	1.11	1.37	
55	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.38	0.57	0.74	0.92	

表4-8 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量						
	20mSv	50mSv	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv
寄与生涯がん死亡確率(%)							
25,28,31	0.35%	0.86%	1.69%	3.31%	4.86%	6.35%	7.78%
35,38,41	0.18%	0.45%	0.90%	1.78%	2.65%	3.50%	4.33%
45,48,51	0.14%	0.36%	0.72%	1.42%	2.12%	2.80%	3.48%
非致死がんからの荷重された寄与(%)							
25,28,31	0.07%	0.17%	0.34%	0.66%	0.97%	1.27%	1.56%
35,38,41	0.04%	0.09%	0.18%	0.36%	0.53%	0.70%	0.87%
45,48,51	0.03%	0.07%	0.14%	0.28%	0.42%	0.56%	0.70%
遺伝的影響からの荷重された寄与(%)							
25,28,31	0.07%	0.17%	0.34%	0.66%	0.97%	1.27%	1.56%
35,38,41	0.04%	0.09%	0.18%	0.36%	0.53%	0.70%	0.87%
45,48,51	0.03%	0.07%	0.14%	0.28%	0.42%	0.56%	0.70%
総合損害(%)							
25,28,31	0.48%	1.20%	2.37%	4.64%	6.81%	8.89%	10.89%
35,38,41	0.25%	0.63%	1.26%	2.50%	3.71%	4.90%	6.07%
45,48,51	0.20%	0.50%	1.00%	1.99%	2.96%	3.92%	4.87%
寄与死亡が生じたときの損失期間(年)							
25,28,31	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	14.0	14.1
35,38,41	12.7	12.7	12.8	12.8	12.9	12.9	13.0
45,48,51	10.9	10.9	10.9	11.0	11.0	11.0	11.0
被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)							
25,28,31	0.05	0.12	0.23	0.45	0.67	0.89	1.10
35,38,41	0.02	0.06	0.11	0.23	0.34	0.45	0.56
45,48,51	0.02	0.04	0.08	0.16	0.23	0.31	0.38

表4-9 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量						
	20mSv	50mSv	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv
寄与生涯がん死亡確率(%)							
25,28,31	0.42%	1.04%	2.06%	4.01%	5.86%	7.62%	9.29%
35,38,41	0.21%	0.53%	1.04%	2.06%	3.06%	4.03%	4.98%
45,48,51	0.16%	0.40%	0.80%	1.58%	2.35%	3.11%	3.85%
非致死がんからの荷重された寄与(%)							
25,28,31	0.08%	0.21%	0.41%	0.80%	1.17%	1.52%	1.86%
35,38,41	0.04%	0.11%	0.21%	0.41%	0.61%	0.81%	1.00%
45,48,51	0.03%	0.08%	0.16%	0.32%	0.47%	0.62%	0.77%
遺伝的影響からの荷重された寄与(%)							
25,28,31	0.08%	0.21%	0.41%	0.80%	1.17%	1.52%	1.86%
35,38,41	0.04%	0.11%	0.21%	0.41%	0.61%	0.81%	1.00%
45,48,51	0.03%	0.08%	0.16%	0.32%	0.47%	0.62%	0.77%
総合損害(%)							
25,28,31	0.59%	1.46%	2.88%	5.61%	8.20%	10.67%	13.01%
35,38,41	0.30%	0.74%	1.46%	2.89%	4.28%	5.64%	6.97%
45,48,51	0.23%	0.56%	1.12%	2.21%	3.29%	4.35%	5.39%
寄与死亡が生じたときの損失期間(年)							
25,28,31	13.9	14.0	14.1	14.2	14.4	14.6	14.7
35,38,41	13.3	13.3	13.4	13.4	13.5	13.6	13.6
45,48,51	11.6	11.6	11.7	11.7	11.7	11.8	11.8
被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)							
25,28,31	0.06	0.15	0.29	0.57	0.84	1.11	1.37
35,38,41	0.03	0.07	0.14	0.28	0.41	0.55	0.68
45,48,51	0.02	0.05	0.09	0.18	0.28	0.37	0.45

表4-10 1年間のミッションを3年間隔で5回行った場合の男性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量						
	20mSv	50mSv	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv
寄与生涯がん死亡確率(%)							
28,31,34,37	0.47%	1.17%	2.31%	4.50%	6.56%	8.51%	10.36%
38,41,44,47	0.28%	0.69%	1.38%	2.71%	4.01%	5.27%	6.50%
48,51,54,57	0.23%	0.56%	1.12%	2.21%	3.28%	4.32%	5.33%
非致死がんからの荷重された寄与(%)							
28,31,34,37	0.10%	0.24%	0.46%	0.90%	1.31%	1.70%	2.07%
38,41,44,47	0.06%	0.14%	0.28%	0.54%	0.80%	1.05%	1.30%
48,51,54,57	0.05%	0.11%	0.22%	0.44%	0.66%	0.86%	1.07%
遺伝的影響からの荷重された寄与(%)							
28,31,34,37	0.10%	0.24%	0.46%	0.90%	1.31%	1.70%	2.07%
38,41,44,47	0.06%	0.14%	0.28%	0.54%	0.80%	1.05%	1.30%
48,51,54,57	0.05%	0.11%	0.22%	0.44%	0.66%	0.86%	1.07%
総合損害(%)							
28,31,34,37	0.66%	1.64%	3.24%	6.29%	9.18%	11.92%	14.51%
38,41,44,47	0.39%	0.97%	1.93%	3.80%	5.61%	7.38%	9.09%
48,51,54,57	0.32%	0.79%	1.57%	3.10%	4.59%	6.04%	7.46%
寄与死亡が生じたときの損失期間(年)							
28,31,34,37	13.3	13.4	13.5	13.7	13.8	14.0	14.2
38,41,44,47	12.3	12.3	12.3	12.4	12.5	12.5	12.6
48,51,54,57	10.3	10.3	10.4	10.4	10.5	10.5	10.5
被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)							
28,31,34,37	0.06	0.16	0.31	0.61	0.91	1.19	1.47
38,41,44,47	0.03	0.09	0.17	0.34	0.50	0.66	0.82
48,51,54,57	0.02	0.06	0.12	0.23	0.34	0.45	0.56

表4-11 1年間のミッションを3年間隔で5回行った場合の女性宇宙飛行士の損害の諸属性

被曝時 年齢	年間被曝線量						
	20mSv	50mSv	100mSv	200mSv	300mSv	400mSv	500mSv
寄与生涯がん死亡確率(%)							
28,31,34,37	0.57%	1.42%	2.79%	5.38%	7.81%	10.07%	12.19%
38,41,44,47	0.32%	0.79%	1.57%	3.09%	4.55%	5.96%	7.32%
48,51,54,57	0.26%	0.64%	1.26%	2.49%	3.68%	4.84%	5.96%
非致死がんからの荷重された寄与(%)							
28,31,34,37	0.12%	0.28%	0.56%	1.08%	1.56%	2.01%	2.44%
38,41,44,47	0.06%	0.16%	0.31%	0.62%	0.91%	1.19%	1.47%
48,51,54,57	0.05%	0.13%	0.25%	0.50%	0.74%	0.97%	1.19%
遺伝的影響からの荷重された寄与(%)							
28,31,34,37	0.12%	0.28%	0.56%	1.08%	1.56%	2.01%	2.44%
38,41,44,47	0.06%	0.16%	0.31%	0.62%	0.91%	1.19%	1.47%
48,51,54,57	0.05%	0.13%	0.25%	0.50%	0.74%	0.97%	1.19%
総合損害(%)							
28,31,34,37	0.80%	1.99%	3.90%	7.54%	10.93%	14.10%	17.07%
38,41,44,47	0.45%	1.11%	2.20%	4.32%	6.37%	8.35%	10.25%
48,51,54,57	0.36%	0.89%	1.77%	3.48%	5.15%	6.77%	8.35%
寄与死亡が生じたときの損失期間(年)							
28,31,34,37	13.8	13.9	14.0	14.3	14.5	14.7	14.9
38,41,44,47	12.9	12.9	13.0	13.1	13.2	13.3	13.4
48,51,54,57	11.0	11.0	11.1	11.1	11.2	11.3	11.3
被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)							
28,31,34,37	0.08	0.20	0.39	0.77	1.13	1.48	1.82
38,41,44,47	0.04	0.10	0.20	0.40	0.60	0.79	0.98
48,51,54,57	0.03	0.07	0.14	0.28	0.41	0.55	0.68

表 4-12. NCRP の現行及び提案されている生涯線量限度 (単位: Sv)

年齢 (歳)	女性		男性	
	現行	案	現行	案
25	1.0	0.5	1.5	0.8
35	1.75	0.9	2.5	1.4
45	2.5	1.2	3.25	2.0
55	3.0	1.7	4.0	3.0

(2) ICRP

ICRP60 は、ある単一の属性に基づいて線量限度を決定することは適当でないとし、いくつかの年間線量を全作業期間にわたり受けた場合で、寄与生涯がん死亡確率を含む6つのリスク属性を計算し、ICRP60 表.5 (本報告書では表 4-13) に示す値を与えている。その上で、総合的に判断して、各属性の容認不可のレベルよりほんのわずかな下であると合理的にみなされるであろう線量レベルとして、5年間の平均値が年あたり 20mSv という実効線量限度を勧告している。 [147~166]

これは、年実効線量 20mSv が与えるこれらのリスクレベルが、地上における放射線業務従事者にとって耐容されうるぎりぎりのレベルであることを示唆していると考えられる。

表 4-13 作業員集団の被曝による損害の諸属性 (ICRP60 表 5 より) *

年実効線量(mSv)	10	20	30	50
概算の生涯線量(Sv)	0.5	1.2	1.4	2.4
寄与生涯がん死亡確率 (%)	1.8	3.6	5.3	8.6
非致死がんからの荷重された寄与 (%) †	0.4	0.7	1.1	1.7
遺伝的影響からの荷重された寄与 (%) †	0.4	0.7	1.1	1.7
総合損害 (%) †	2.5	5	7.5	12
寄与死亡が生じたときの損失期間 (年)	13	13	13	13
18 歳における平均余命の平均損失 (年)	0.2	0.5	0.7	1.1

* これらの値はすべて付属書 C から導かれている (155 項参照)。もっと広範囲の集団を扱っている付属書 B では、寄与死亡による損失期間の推定値はこれらよりもいくぶん高い

† 重篤度および寿命損失について荷重されている。

‡ 寄与致死がんの確率あるいはこれに相当する損害の合計 (丸めた値) である。

上記の通り、属性として NCRP は寄与生涯がん死亡確率を用い、それが 3% となる線量を限度としている。また、ICRP60 の算定している 6 つの属性のうち、最も重要¹¹かつ、直裁的な表現で理解しやすいと考えられるものは寄与生涯がん死亡確率であり、その他の属性はそれに係数を乗じ、又はその算定の過程において派生して算定できるものであることから、主として寄与生涯がん死亡確率を用いて線量限度を設定することとし、「遺伝的影響からの荷重された寄与」を含むその他の 5 つの属性についても算定しその値を確認することとした。

線量限度の設定にあたり採用する寄与生涯がん死亡確率のレベルについては、ICRP60 が「耐用可

¹¹ Land CE, Sinclair WK: The Relative Contributions of Different Organ Sites to the Total Cancer Mortality Associated with Low-Dose Radiation Exposure, Ann.ICRP 22:31-57,1991

(tolerable)』と示唆している 3.6%より低い、NCRP98 が採用している 3 %を用いることが適当であると考え。ただし、4.2 項で述べたとおり、同じリスクレベルであっても、その宇宙ステーション滞在条件（被曝条件）によって与える線量が異なる。そのため、通常宇宙ステーション宇宙飛行士に最も想定されやすい宇宙ステーション滞在条件、すなわち 3 年間隔 3 回で寄与生涯がん死亡確率 3 %となるように線量限度を設定することが最も妥当であると考え。しかし、その様にして限度を設定した場合、例えば搭乗間隔が短くなった場合には、当然寄与生涯がん死亡確率 3 %を越えることが考えられるが、その場合でも、日本人の致死がんの自然リスク 30%¹²の 1/6 である 5%を上回らないようにすることが妥当であると考え。

4. 4 提案する生涯線量限度

宇宙飛行士の宇宙放射線被曝は、地上における放射線業務従事者の被曝と異なり、定常的なものではないため、NCRP98 と同様に生涯の線量限度を設定し、その確率的影響のリスクを管理することが妥当であると考え。用いる量は、それが確率的影響のリスク管理に用いられることから、実効線量当量を用いることとする¹³。

生涯線量限度の設定にあたり、4.3 項で述べたリスクレベルをもとに、それについて年線量を 25mSv きざみ、また 30 歳未満については $C_{D,A0}$ が大きく、寄与生涯がん死亡確率が大きく変化するため、1 歳きざみで計算した。

4.2 項の 6 つの属性の計算結果を表 4-14～4-25 に示す。

表 4-14、4-15 の寄与生涯がん死亡確率が 3 %に最も近いリスクを与える生涯線量(年(ミッション)線量×3)の 10mSv の位を切り捨てることによって得られる生涯線量限度(案)を表 4-26 に示す。

滞在開始年齢の始期は、宇宙飛行士は大学卒業以上 3 年以上の実務経験を応募条件とし、さらに最低 2 年の訓練期間等を要することから、最若の 27 歳とした。

表 4-26. 宇宙ステーション宇宙飛行士の生涯線量限度(案)

滞在開始年齢 (歳)	男性 (mSv)	女性 (mSv)
27	600	600
30	900	800
35	1000	900
40	1200	1100
45	1200	1100

なお、表中にない被曝開始年齢の生涯線量限度はその年齢より若い表中の被曝開始年齢のものを適用する。

¹² 平成 8 年度人口動態統計

¹³ 宇宙放射線被曝については、高 LET 放射線の寄与が大きく、高 LET 放射線は低線量率および/または分割照射により確率的影響の生物効果が増加すること(逆線量率効果)が指摘されているが、ICRP60 で示されている $Q(L)$ はこれをも考慮し決められていると考えられる(ICRP[B69])ことから、現時点では、放射線生物学の情報が不確かである(ICRP60[A9])ものの $Q(L)$ を用いて算定される実効線量当量を用いることは妥当であると考え。

表4-14 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の寄与死亡の確率

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	寄与生涯がん死亡確率(%)																				
25, 28, 31	1.693%	2.105%	2.512%	2.914%	3.313%	3.707%	4.097%	4.482%	4.864%	5.241%	5.615%	5.985%	6.351%	6.713%	7.071%	7.426%	7.777%	8.124%	8.468%	8.809%	9.146%
26, 29, 32	1.699%	2.112%	2.520%	2.924%	3.324%	3.720%	4.111%	4.498%	4.881%	5.260%	5.635%	6.006%	6.374%	6.737%	7.097%	7.453%	7.806%	8.155%	8.500%	8.842%	9.181%
27, 30, 33	1.331%	1.657%	1.980%	2.300%	2.618%	2.934%	3.247%	3.557%	3.865%	4.170%	4.473%	4.774%	5.072%	5.368%	5.662%	5.953%	6.242%	6.529%	6.814%	7.096%	7.376%
28, 31, 34	1.335%	1.663%	1.987%	2.309%	2.628%	2.944%	3.258%	3.570%	3.879%	4.186%	4.490%	4.791%	5.091%	5.388%	5.683%	5.975%	6.266%	6.554%	6.839%	7.123%	7.404%
29, 32, 35	1.340%	1.668%	1.993%	2.316%	2.636%	2.954%	3.269%	3.582%	3.892%	4.199%	4.505%	4.808%	5.108%	5.406%	5.702%	5.996%	6.287%	6.576%	6.863%	7.148%	7.430%
30, 33, 36	0.965%	1.203%	1.439%	1.675%	1.909%	2.142%	2.373%	2.604%	2.833%	3.061%	3.287%	3.513%	3.737%	3.960%	4.182%	4.403%	4.623%	4.841%	5.059%	5.275%	5.490%
35, 38, 41	0.900%	1.123%	1.344%	1.564%	1.783%	2.001%	2.218%	2.434%	2.649%	2.863%	3.076%	3.288%	3.498%	3.708%	3.917%	4.125%	4.332%	4.538%	4.743%	4.947%	5.150%
40, 43, 46	0.745%	0.929%	1.113%	1.296%	1.478%	1.659%	1.840%	2.020%	2.200%	2.378%	2.557%	2.734%	2.911%	3.087%	3.262%	3.437%	3.611%	3.784%	3.957%	4.129%	4.300%
45, 48, 51	0.717%	0.894%	1.071%	1.247%	1.422%	1.597%	1.771%	1.945%	2.117%	2.290%	2.461%	2.632%	2.802%	2.972%	3.141%	3.309%	3.477%	3.644%	3.810%	3.976%	4.141%

表4-15 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の寄与死亡の確率

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	寄与生涯がん死亡確率(%)																				
25, 28, 31	2.057%	2.555%	3.046%	3.530%	4.008%	4.480%	4.946%	5.406%	5.860%	6.308%	6.750%	7.187%	7.618%	8.044%	8.465%	8.880%	9.290%	9.695%	10.095%	10.490%	10.880%
26, 29, 32	2.059%	2.557%	3.048%	3.533%	4.012%	4.484%	4.951%	5.411%	5.865%	6.314%	6.757%	7.194%	7.626%	8.052%	8.474%	8.889%	9.300%	9.706%	10.106%	10.502%	10.893%
27, 30, 33	1.606%	1.998%	2.386%	2.770%	3.150%	3.526%	3.898%	4.267%	4.632%	4.994%	5.352%	5.707%	6.058%	6.406%	6.750%	7.091%	7.429%	7.764%	8.095%	8.424%	8.749%
28, 31, 34	1.608%	2.000%	2.388%	2.772%	3.152%	3.529%	3.902%	4.271%	4.637%	4.999%	5.357%	5.712%	6.064%	6.412%	6.757%	7.099%	7.437%	7.772%	8.104%	8.433%	8.759%
29, 32, 35	1.609%	2.001%	2.389%	2.774%	3.155%	3.532%	3.905%	4.274%	4.640%	5.003%	5.362%	5.717%	6.069%	6.418%	6.763%	7.105%	7.444%	7.779%	8.112%	8.441%	8.767%
30, 33, 36	1.149%	1.431%	1.712%	1.990%	2.267%	2.542%	2.815%	3.086%	3.355%	3.623%	3.888%	4.152%	4.414%	4.675%	4.933%	5.190%	5.446%	5.699%	5.951%	6.202%	6.450%
35, 38, 41	1.044%	1.301%	1.556%	1.810%	2.063%	2.314%	2.563%	2.811%	3.057%	3.302%	3.546%	3.788%	4.029%	4.268%	4.506%	4.742%	4.977%	5.211%	5.443%	5.674%	5.904%
40, 43, 46	0.822%	1.026%	1.228%	1.429%	1.630%	1.829%	2.028%	2.226%	2.423%	2.619%	2.814%	3.008%	3.201%	3.394%	3.585%	3.776%	3.966%	4.155%	4.343%	4.531%	4.717%
45, 48, 51	0.797%	0.994%	1.190%	1.386%	1.580%	1.774%	1.966%	2.158%	2.349%	2.539%	2.729%	2.917%	3.105%	3.292%	3.478%	3.663%	3.847%	4.031%	4.214%	4.396%	4.577%

表4-16 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の非致死がんからの荷重された寄与

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	非致死がんからの荷重された寄与(%)																				
25, 28, 31	0.34%	0.42%	0.50%	0.58%	0.66%	0.74%	0.82%	0.90%	0.97%	1.05%	1.12%	1.20%	1.27%	1.34%	1.41%	1.49%	1.56%	1.63%	1.69%	1.76%	1.83%
26, 29, 32	0.34%	0.42%	0.50%	0.59%	0.67%	0.74%	0.82%	0.90%	0.98%	1.05%	1.13%	1.20%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.56%	1.63%	1.70%	1.77%	1.84%
27, 30, 33	0.27%	0.33%	0.40%	0.46%	0.52%	0.59%	0.65%	0.71%	0.77%	0.83%	0.90%	0.96%	1.01%	1.07%	1.13%	1.19%	1.25%	1.31%	1.36%	1.42%	1.48%
28, 31, 34	0.27%	0.33%	0.40%	0.46%	0.53%	0.59%	0.65%	0.71%	0.78%	0.84%	0.90%	0.96%	1.02%	1.08%	1.14%	1.20%	1.25%	1.31%	1.37%	1.43%	1.48%
29, 32, 35	0.27%	0.33%	0.40%	0.46%	0.53%	0.59%	0.65%	0.72%	0.78%	0.84%	0.90%	0.96%	1.02%	1.08%	1.14%	1.20%	1.26%	1.32%	1.37%	1.43%	1.49%
30, 33, 36	0.19%	0.24%	0.29%	0.34%	0.38%	0.43%	0.48%	0.52%	0.57%	0.61%	0.66%	0.70%	0.75%	0.79%	0.84%	0.88%	0.93%	0.97%	1.01%	1.06%	1.10%
35, 38, 41	0.18%	0.23%	0.27%	0.31%	0.36%	0.40%	0.44%	0.49%	0.53%	0.57%	0.62%	0.66%	0.70%	0.74%	0.78%	0.83%	0.87%	0.91%	0.95%	0.99%	1.03%
40, 43, 46	0.15%	0.19%	0.22%	0.26%	0.30%	0.33%	0.37%	0.40%	0.44%	0.48%	0.51%	0.55%	0.58%	0.62%	0.65%	0.69%	0.72%	0.76%	0.79%	0.83%	0.86%
45, 48, 51	0.14%	0.18%	0.21%	0.25%	0.28%	0.32%	0.35%	0.39%	0.42%	0.46%	0.49%	0.53%	0.56%	0.59%	0.63%	0.66%	0.70%	0.73%	0.76%	0.80%	0.83%

表4-17 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の非致死がんからの荷重された寄与

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	非致死がんからの荷重された寄与(%)																				
25, 28, 31	0.41%	0.51%	0.61%	0.71%	0.80%	0.90%	0.99%	1.08%	1.17%	1.26%	1.35%	1.44%	1.52%	1.61%	1.69%	1.78%	1.86%	1.94%	2.02%	2.10%	2.18%
26, 29, 32	0.41%	0.51%	0.61%	0.71%	0.80%	0.90%	0.99%	1.08%	1.17%	1.26%	1.35%	1.44%	1.53%	1.61%	1.70%	1.78%	1.86%	1.94%	2.02%	2.10%	2.18%
27, 30, 33	0.32%	0.40%	0.48%	0.55%	0.63%	0.71%	0.78%	0.85%	0.93%	1.00%	1.07%	1.14%	1.21%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.55%	1.62%	1.69%	1.75%
28, 31, 34	0.32%	0.40%	0.48%	0.55%	0.63%	0.71%	0.78%	0.85%	0.93%	1.00%	1.07%	1.14%	1.21%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.55%	1.62%	1.69%	1.75%
29, 32, 35	0.32%	0.40%	0.48%	0.56%	0.63%	0.71%	0.78%	0.86%	0.93%	1.00%	1.07%	1.14%	1.21%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.56%	1.62%	1.69%	1.75%
30, 33, 36	0.23%	0.29%	0.34%	0.40%	0.45%	0.51%	0.56%	0.62%	0.67%	0.73%	0.78%	0.83%	0.88%	0.94%	0.99%	1.04%	1.09%	1.14%	1.19%	1.24%	1.29%
35, 38, 41	0.21%	0.26%	0.31%	0.36%	0.41%	0.46%	0.51%	0.56%	0.61%	0.66%	0.71%	0.76%	0.81%	0.85%	0.90%	0.95%	1.00%	1.04%	1.09%	1.14%	1.18%
40, 43, 46	0.16%	0.21%	0.25%	0.29%	0.33%	0.37%	0.41%	0.45%	0.49%	0.52%	0.56%	0.60%	0.64%	0.68%	0.72%	0.76%	0.79%	0.83%	0.87%	0.91%	0.94%
45, 48, 51	0.16%	0.20%	0.24%	0.28%	0.32%	0.36%	0.39%	0.43%	0.47%	0.51%	0.55%	0.58%	0.62%	0.66%	0.70%	0.73%	0.77%	0.81%	0.84%	0.88%	0.92%

表4-18 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の遺伝的影響からの荷重された奇与

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	遺伝的影響からの荷重された奇与(%)																				
25, 28, 31	0.34%	0.42%	0.50%	0.58%	0.66%	0.74%	0.82%	0.90%	0.97%	1.05%	1.12%	1.20%	1.27%	1.34%	1.41%	1.49%	1.56%	1.63%	1.69%	1.76%	1.83%
26, 29, 32	0.34%	0.42%	0.50%	0.59%	0.67%	0.74%	0.82%	0.90%	0.98%	1.05%	1.13%	1.20%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.56%	1.63%	1.70%	1.77%	1.84%
27, 30, 33	0.27%	0.33%	0.40%	0.46%	0.52%	0.59%	0.65%	0.71%	0.77%	0.83%	0.90%	0.96%	1.01%	1.07%	1.13%	1.19%	1.25%	1.31%	1.36%	1.42%	1.48%
28, 31, 34	0.27%	0.33%	0.40%	0.46%	0.53%	0.59%	0.65%	0.71%	0.78%	0.84%	0.90%	0.96%	1.02%	1.08%	1.14%	1.20%	1.25%	1.31%	1.37%	1.43%	1.48%
29, 32, 35	0.27%	0.33%	0.40%	0.46%	0.53%	0.59%	0.65%	0.72%	0.78%	0.84%	0.90%	0.96%	1.02%	1.08%	1.14%	1.20%	1.26%	1.32%	1.37%	1.43%	1.49%
30, 33, 36	0.19%	0.24%	0.29%	0.34%	0.38%	0.43%	0.48%	0.52%	0.57%	0.61%	0.66%	0.70%	0.75%	0.79%	0.84%	0.88%	0.93%	0.97%	1.01%	1.06%	1.10%
35, 38, 41	0.18%	0.23%	0.27%	0.31%	0.36%	0.40%	0.44%	0.49%	0.53%	0.57%	0.62%	0.66%	0.70%	0.74%	0.78%	0.83%	0.87%	0.91%	0.95%	0.99%	1.03%
40, 43, 46	0.15%	0.19%	0.22%	0.26%	0.30%	0.33%	0.37%	0.40%	0.44%	0.48%	0.51%	0.55%	0.58%	0.62%	0.65%	0.69%	0.72%	0.76%	0.79%	0.83%	0.86%
45, 48, 51	0.14%	0.18%	0.21%	0.25%	0.28%	0.32%	0.35%	0.39%	0.42%	0.46%	0.49%	0.53%	0.56%	0.59%	0.63%	0.66%	0.70%	0.73%	0.76%	0.80%	0.83%

表4-19 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の遺伝的影響からの荷重された奇与

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	遺伝的影響からの荷重された奇与(%)																				
25, 28, 31	0.41%	0.51%	0.61%	0.71%	0.80%	0.90%	0.99%	1.08%	1.17%	1.26%	1.35%	1.44%	1.52%	1.61%	1.69%	1.78%	1.86%	1.94%	2.02%	2.10%	2.18%
26, 29, 32	0.41%	0.51%	0.61%	0.71%	0.80%	0.90%	0.99%	1.08%	1.17%	1.26%	1.35%	1.44%	1.53%	1.61%	1.70%	1.78%	1.86%	1.94%	2.02%	2.10%	2.18%
27, 30, 33	0.32%	0.40%	0.48%	0.55%	0.63%	0.71%	0.78%	0.85%	0.93%	1.00%	1.07%	1.14%	1.21%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.55%	1.62%	1.69%	1.75%
28, 31, 34	0.32%	0.40%	0.48%	0.55%	0.63%	0.71%	0.78%	0.85%	0.93%	1.00%	1.07%	1.14%	1.21%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.55%	1.62%	1.69%	1.75%
29, 32, 35	0.32%	0.40%	0.48%	0.56%	0.63%	0.71%	0.78%	0.86%	0.93%	1.00%	1.07%	1.14%	1.21%	1.28%	1.35%	1.42%	1.49%	1.56%	1.62%	1.69%	1.75%
30, 33, 36	0.23%	0.29%	0.34%	0.40%	0.45%	0.51%	0.56%	0.62%	0.67%	0.73%	0.78%	0.83%	0.88%	0.94%	0.99%	1.04%	1.09%	1.14%	1.19%	1.24%	1.29%
35, 38, 41	0.21%	0.26%	0.31%	0.36%	0.41%	0.46%	0.51%	0.56%	0.61%	0.66%	0.71%	0.76%	0.81%	0.85%	0.90%	0.95%	1.00%	1.04%	1.09%	1.14%	1.18%
40, 43, 46	0.16%	0.21%	0.25%	0.29%	0.33%	0.37%	0.41%	0.45%	0.49%	0.52%	0.56%	0.60%	0.64%	0.68%	0.72%	0.76%	0.79%	0.83%	0.87%	0.91%	0.94%
45, 48, 51	0.16%	0.20%	0.24%	0.28%	0.32%	0.36%	0.39%	0.43%	0.47%	0.51%	0.55%	0.58%	0.62%	0.66%	0.70%	0.73%	0.77%	0.81%	0.84%	0.88%	0.92%

表4-20 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の総合損害

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	総合損害(%)																				
25, 28, 31	2.37%	2.95%	3.52%	4.08%	4.64%	5.19%	5.74%	6.28%	6.81%	7.34%	7.86%	8.38%	8.89%	9.40%	9.90%	10.40%	10.89%	11.37%	11.86%	12.33%	12.80%
26, 29, 32	2.38%	2.96%	3.53%	4.09%	4.65%	5.21%	5.76%	6.30%	6.83%	7.36%	7.89%	8.41%	8.92%	9.43%	9.94%	10.43%	10.93%	11.42%	11.90%	12.38%	12.85%
27, 30, 33	1.86%	2.32%	2.77%	3.22%	3.67%	4.11%	4.55%	4.98%	5.41%	5.84%	6.26%	6.68%	7.10%	7.52%	7.93%	8.33%	8.74%	9.14%	9.54%	9.94%	10.33%
28, 31, 34	1.87%	2.33%	2.78%	3.23%	3.68%	4.12%	4.56%	5.00%	5.43%	5.86%	6.29%	6.71%	7.13%	7.54%	7.96%	8.37%	8.77%	9.18%	9.58%	9.97%	10.37%
29, 32, 35	1.88%	2.34%	2.79%	3.24%	3.69%	4.14%	4.58%	5.01%	5.45%	5.88%	6.31%	6.73%	7.15%	7.57%	7.98%	8.39%	8.80%	9.21%	9.61%	10.01%	10.40%
30, 33, 36	1.35%	1.68%	2.02%	2.35%	2.67%	3.00%	3.32%	3.65%	3.97%	4.29%	4.60%	4.92%	5.23%	5.54%	5.86%	6.16%	6.47%	6.78%	7.08%	7.39%	7.69%
35, 38, 41	1.26%	1.57%	1.88%	2.19%	2.50%	2.80%	3.11%	3.41%	3.71%	4.01%	4.31%	4.60%	4.90%	5.19%	5.48%	5.78%	6.07%	6.35%	6.64%	6.93%	7.21%
40, 43, 46	1.04%	1.30%	1.56%	1.81%	2.07%	2.32%	2.58%	2.83%	3.08%	3.33%	3.58%	3.83%	4.08%	4.32%	4.57%	4.81%	5.06%	5.30%	5.54%	5.78%	6.02%
45, 48, 51	1.00%	1.25%	1.50%	1.75%	1.99%	2.24%	2.48%	2.72%	2.96%	3.21%	3.45%	3.69%	3.92%	4.16%	4.40%	4.63%	4.87%	5.10%	5.33%	5.57%	5.80%

表4-21 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の総合損害

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	総合損害(%)																				
25, 28, 31	2.88%	3.58%	4.26%	4.94%	5.61%	6.27%	6.92%	7.57%	8.20%	8.83%	9.45%	10.06%	10.67%	11.26%	11.85%	12.43%	13.01%	13.57%	14.13%	14.69%	15.23%
26, 29, 32	2.88%	3.58%	4.27%	4.95%	5.62%	6.28%	6.93%	7.58%	8.21%	8.84%	9.46%	10.07%	10.68%	11.27%	11.86%	12.45%	13.02%	13.59%	14.15%	14.70%	15.25%
27, 30, 33	2.25%	2.80%	3.34%	3.88%	4.41%	4.94%	5.46%	5.97%	6.49%	6.99%	7.49%	7.99%	8.48%	8.97%	9.45%	9.93%	10.40%	10.87%	11.33%	11.79%	12.25%
28, 31, 34	2.25%	2.80%	3.34%	3.88%	4.41%	4.94%	5.46%	5.98%	6.49%	7.00%	7.50%	8.00%	8.49%	8.98%	9.46%	9.94%	10.41%	10.88%	11.35%	11.81%	12.26%
29, 32, 35	2.25%	2.80%	3.35%	3.88%	4.42%	4.94%	5.47%	5.98%	6.50%	7.00%	7.51%	8.00%	8.50%	8.99%	9.47%	9.95%	10.42%	10.89%	11.36%	11.82%	12.27%
30, 33, 36	1.61%	2.00%	2.40%	2.79%	3.17%	3.56%	3.94%	4.32%	4.70%	5.07%	5.44%	5.81%	6.18%	6.55%	6.91%	7.27%	7.62%	7.98%	8.33%	8.68%	9.03%
35, 38, 41	1.46%	1.82%	2.18%	2.53%	2.89%	3.24%	3.59%	3.94%	4.28%	4.62%	4.96%	5.30%	5.64%	5.98%	6.31%	6.64%	6.97%	7.30%	7.62%	7.94%	8.27%
40, 43, 46	1.15%	1.44%	1.72%	2.00%	2.28%	2.56%	2.84%	3.12%	3.39%	3.67%	3.94%	4.21%	4.48%	4.75%	5.02%	5.29%	5.55%	5.82%	6.08%	6.34%	6.60%
45, 48, 51	1.12%	1.39%	1.67%	1.94%	2.21%	2.48%	2.75%	3.02%	3.29%	3.56%	3.82%	4.08%	4.35%	4.61%	4.87%	5.13%	5.39%	5.64%	5.90%	6.15%	6.41%

表4-22 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の寄与死亡が生じたときの損失期間

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	寄与死亡が生じたときの損失期間(年)																				
25, 28, 31	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.8	13.8	13.8	13.9	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.1	14.1	14.1	14.2	14.2	14.2
26, 29, 32	13.5	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.8	13.8	13.8	13.9	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.1	14.1	14.1
27, 30, 33	13.6	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.7	13.8	13.8	13.8	13.8	13.9	13.9	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.0	14.1
28, 31, 34	13.5	13.5	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.7	13.8	13.8	13.8	13.8	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
29, 32, 35	13.3	13.4	13.4	13.4	13.4	13.5	13.5	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.7	13.8	13.8	13.8	13.8
30, 33, 36	13.4	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.8
35, 38, 41	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
40, 43, 46	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
45, 48, 51	10.9	10.9	10.9	10.9	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1

表4-23 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の寄与死亡が生じたときの損失期間

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	寄与死亡が生じたときの損失期間(年)																				
25, 28, 31	14.1	14.1	14.2	14.2	14.2	14.3	14.3	14.4	14.4	14.4	14.5	14.5	14.6	14.6	14.7	14.7	14.7	14.8	14.8	14.9	14.9
26, 29, 32	14.0	14.0	14.1	14.1	14.2	14.2	14.3	14.3	14.3	14.4	14.4	14.5	14.5	14.5	14.6	14.6	14.7	14.7	14.7	14.8	14.8
27, 30, 33	14.0	14.1	14.1	14.1	14.2	14.2	14.2	14.3	14.3	14.3	14.4	14.4	14.4	14.5	14.5	14.5	14.5	14.6	14.6	14.6	14.7
28, 31, 34	14.0	14.0	14.0	14.1	14.1	14.1	14.1	14.2	14.2	14.2	14.3	14.3	14.3	14.4	14.4	14.4	14.5	14.5	14.5	14.6	14.6
29, 32, 35	13.9	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.1	14.1	14.1	14.2	14.2	14.2	14.2	14.3	14.3	14.3	14.4	14.4	14.4	14.5	14.5
30, 33, 36	13.9	13.9	13.9	14.0	14.0	14.0	14.0	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.3	14.3	14.3	14.3
35, 38, 41	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.7	13.7	13.7	13.7
40, 43, 46	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
45, 48, 51	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.9	11.9

表4-24 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の男性宇宙飛行士の被曝時年齢における平均余命の平均損失

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)																				
25, 28, 31	0.23	0.29	0.34	0.40	0.45	0.51	0.56	0.62	0.67	0.73	0.78	0.83	0.89	0.94	0.99	1.04	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30
26, 29, 32	0.23	0.29	0.34	0.40	0.45	0.51	0.56	0.62	0.67	0.72	0.78	0.83	0.88	0.94	0.99	1.04	1.09	1.14	1.20	1.25	1.30
27, 30, 33	0.18	0.22	0.27	0.31	0.36	0.40	0.45	0.49	0.53	0.57	0.62	0.66	0.70	0.75	0.79	0.83	0.87	0.91	0.95	1.00	1.04
28, 31, 34	0.18	0.22	0.27	0.31	0.36	0.40	0.44	0.49	0.53	0.57	0.62	0.66	0.70	0.74	0.78	0.83	0.87	0.91	0.95	0.99	1.03
29, 32, 35	0.18	0.22	0.27	0.31	0.35	0.40	0.44	0.48	0.53	0.57	0.61	0.65	0.70	0.74	0.78	0.82	0.86	0.90	0.95	0.99	1.03
30, 33, 36	0.13	0.16	0.19	0.23	0.26	0.29	0.32	0.35	0.38	0.42	0.45	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.63	0.66	0.69	0.72	0.76
35, 38, 41	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.26	0.28	0.31	0.34	0.37	0.40	0.42	0.45	0.48	0.51	0.53	0.56	0.59	0.62	0.64	0.67
40, 43, 46	0.09	0.11	0.13	0.15	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50	0.52
45, 48, 51	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46

表4-25 1年間のミッションを3年間隔で3回行った場合の女性宇宙飛行士の被曝時年齢における平均余命の平均損失

年線量 (累積線量)	100mSv (300mSv)	125mSv (375mSv)	150mSv (450mSv)	175mSv (525mSv)	200mSv (600mSv)	225mSv (675mSv)	250mSv (750mSv)	275mSv (825mSv)	300mSv (900mSv)	325mSv (975mSv)	350mSv (1050mSv)	375mSv (1125mSv)	400mSv (1200mSv)	425mSv (1275mSv)	450mSv (1350mSv)	475mSv (1425mSv)	500mSv (1500mSv)	525mSv (1575mSv)	550mSv (1650mSv)	575mSv (1725mSv)	600mSv (1800mSv)
被曝時 年齢	被曝開始年齢における平均余命の平均損失(年)																				
25, 28, 31	0.29	0.36	0.43	0.50	0.57	0.64	0.71	0.78	0.84	0.91	0.98	1.04	1.11	1.18	1.24	1.31	1.37	1.43	1.50	1.56	1.62
26, 29, 32	0.29	0.36	0.43	0.50	0.57	0.64	0.71	0.77	0.84	0.91	0.97	1.04	1.11	1.17	1.24	1.30	1.36	1.43	1.49	1.55	1.61
27, 30, 33	0.23	0.28	0.34	0.39	0.45	0.50	0.55	0.61	0.66	0.72	0.77	0.82	0.87	0.93	0.98	1.03	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28
28, 31, 34	0.22	0.28	0.33	0.39	0.44	0.50	0.55	0.61	0.66	0.71	0.76	0.82	0.87	0.92	0.97	1.02	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28
29, 32, 35	0.22	0.28	0.33	0.39	0.44	0.50	0.55	0.60	0.66	0.71	0.76	0.81	0.86	0.92	0.97	1.02	1.07	1.12	1.17	1.22	1.27
30, 33, 36	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.43	0.47	0.51	0.55	0.59	0.63	0.66	0.70	0.74	0.78	0.81	0.85	0.89	0.92
35, 38, 41	0.14	0.17	0.21	0.24	0.28	0.31	0.34	0.38	0.41	0.45	0.48	0.51	0.55	0.58	0.61	0.65	0.68	0.71	0.74	0.78	0.81
40, 43, 46	0.10	0.13	0.16	0.18	0.21	0.23	0.26	0.28	0.31	0.33	0.36	0.38	0.41	0.43	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	0.61
45, 48, 51	0.09	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21	0.23	0.25	0.28	0.30	0.32	0.34	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45	0.48	0.50	0.52	0.54

宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量限度（案）（本項の生涯線量限度案、及び5-4項で示す組織線量限度案）を用いて、確率的影響のリスクが最大となるような運用を行った場合について、寄与生涯がん死亡確率の計算を行った。すなわち、

- 骨髄の組織線量限度が最も早く年間線量限度に達すると仮定し、通常、それと実効線量当量は近い値になると考えられることから、年間の被曝線量を実効線量当量で500mSvとした。
- それを毎年、生涯線量限度になるまで被曝した場合の寄与生涯がん死亡確率について計算した。

結果を表4-27に示す。

宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量限度に沿って、リスクが最大となると想定される滞在を行った場合、寄与生涯がん死亡確率は、最も高い27歳の場合でも5%以内、30歳代以上では3%代に留まることが確認される。

表4-27. 最大想定リスク計算結果

年間被曝線量	性別	滞在開始年齢	年線量	滞在年齢	年線量	滞在年齢	年線量	累積線量	寄与死亡確率
500mSv	男	27	500 mSv	28	100 mSv			600 mSv	4.02%
	女	27	500 mSv	28	100 mSv			600 mSv	4.86%
	男	30	500 mSv	31	400 mSv			900 mSv	2.82%
	女	30	500 mSv	31	300 mSv			800 mSv	2.99%
	男	35	500 mSv	36	500 mSv			1000 mSv	3.17%
	女	35	500 mSv	36	400 mSv			900 mSv	3.37%
	男	40	500 mSv	41	500 mSv	42	200 mSv	1200 mSv	2.95%
	女	40	500 mSv	41	500 mSv	42	100 mSv	1100 mSv	2.98%

5. 確定的影響の評価

5. 1 確定的影響と「しきい値」

確定的影響とは、線量が臨床的影響に関する「しきい値」と呼ばれるある値までは、その影響を生ずる確率がゼロで、それを超えると確率が急速に1 (100%)にまで増加し、その重篤度が線量又は線量率とともに増大する影響をいう。

ICRP41 は、「確定的影響¹に関する種々の組織の放射線感受性に関する我々の知識は、放射線治療の経験に基づいている」として、「照射後5年以内に、照射を受けた人々のほぼ1～5%に重篤な確定的影響を引き起こすために組織に与えられなければならない通常分割のX線あるいはγ線の量をしきい線量」とし、「放射線治療に適切な照射条件—すなわち、4～7週間にわたり与えられるX線あるいはγ線の20～35分割照射の場合にあてはまる」各組織の耐容線量を Table. 5 (本報告書表 5-1)に示している。

表 5-1 から、しきい線量が比較的低い臓器・組織及び影響は、精巣及び卵巣の不妊、水晶体の白内障、骨髄の形成不全等である。ICRP41 はこれらの臓器についての推定しきい値を Table. 6 に与え、ICRP60[Table.B-1]もこれを踏襲している。

なお、ICRP41 は、Table. 6 に推定しきい値を与えていない皮膚について、[IV-A 項]に1回短時間照射による影響として、6～8 Gy で紅斑、3～5 Gy で一過性脱毛が起こりうる等とし、また、ICRP59²でも早期紅斑が2 Gy 以上の急性照射で生じうる等としているので、これについても考察することとし、これらをまとめて表 5-2 に示す。

¹ ICRP41 では、「非確率的影響」と記載されていたが、本報告書ではICRP60に倣い、「確定的影響」と記すこととする。

² ICRP Pub.59, The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin, 1991

表 5-1. X線またはγ線の通常分割治療照射における患者の反応に基づいた、
いろいろな組織の臨床的に有害な確定的影響のおよその推定しきい線量[§]

臓器	5年目の傷害	1～5%の 患者に影響を 生ずる線量 (Gy)	25～50%の 患者に影響を 生ずる線量 (Gy)	照射野 (面積)
皮膚	潰瘍、重篤な線維化	5.5	7.0	100cm ²
口腔粘膜	潰瘍、重篤な線維化	6.0	7.5	50cm ²
食道	潰瘍、狭窄	6.0	7.5	75cm ²
胃	潰瘍、穿孔	4.5	5.0	100cm ²
小腸	潰瘍、狭窄	4.5	6.5	100cm ²
大腸	潰瘍、狭窄	4.5	6.5	100cm ²
直腸	潰瘍、狭窄	5.5	8.0	100cm ²
だ液腺	口内乾燥症	5.0	7.0	50cm ²
肝	肝機能不全、腹水	3.5	4.5	全体
腎	萎縮腎	2.3	2.8	全体
膀胱	潰瘍、拘縮	6.0	8.0	全体
尿管	狭窄、閉塞	7.5	10.0	5-10cm ²
睾丸	永久不妊	5-15	2.0	全体
卵巢	永久不妊	2-3	6-12	全体
子宮	壊死、穿孔	>10.0	>20.0	全体
膣	潰瘍、瘻孔	9.0	>10.0	5cm ²
乳腺、子供	発育停止	1.0	1.5	5cm ²
乳腺、大人	萎縮と壊死	>5.0	>10.0	全体
肺	間質性肺炎、線維化	4.0	6.0	肺葉
毛細血管	毛細管拡張症、硬化症	5.0-6.0	7.0-10.0	-
心臓	心外膜炎、汎心炎	4.0	>10.0	全体
骨、子供	成長停止	2.0	3.0	10cm ²
骨、大人	壊死、骨折	6.0	15.0	10cm ²
軟骨、子供	成長停止	1.0	3.0	全体
軟骨、大人	壊死	6.0	10.0	全体
中枢神経系 (脳)	壊死	5.0	>6.0	全体
脊髄	壊死、横断麻痺	5.0	>6.0	5cm ²
眼	汎眼球炎、出血	5.5	10.0	全体
角膜	角膜炎	5.0	>6.0	全体
水晶体	白内障	5	12	全体
耳 (内耳)	難聴	>6.0		全体
耳前庭	メニエル病	6.0	10.0	全体
甲状腺	甲状腺機能低下	4.5	15.0	全体
副腎	副腎機能低下	>6.0		全体
下垂体	下垂体機能低下	4.5	20.0-30.0	全体
筋肉、子供	形成不全	2.0-3.0	4.0-5.0	全体
筋肉、大人	萎縮	>10.0		全体
骨髓	形成不全	2	5.5	全体
骨髓	形成不全	2.0	4.0-5.0	局所
リンパ節	萎縮	3.5-4.5	>7.0	-
リンパ管	硬化症	5.0	>8.0	-
胎児	死亡	2	4.5	全身

§ : Rubin and Casarett, 1972 による ; UNSCEAR, 1982

表 5-2. 成人の精巣、卵巣、水晶体、骨髄及び皮膚における
確定的影響のしきい値の推定値*

組織 及び影響	1 回短時間被曝 で受けた全線量 当量又は全等価 線量 (Sv)	多分割/遷延被曝 で受けた全線量 当量又は全等価 線量 (Sv)	多分割/遷延被曝 を多年にわたり 毎年受けた時の 年線量率(Sv/年)
精 巣			
一時的不妊	0. 1 5	NA *	0. 4
永久不妊	3. 5	NA	2. 0
卵 巣			
不妊	2. 5 - 6. 0	6. 0	> 0. 2
水 晶 体			
検知可能な白濁	0. 5 - 2. 0 §	5	> 0. 1
視力障害(白内障)	5. 0 †	> 8	> 0. 1 5
骨 髄			
造血能低下	0. 5	NA	> 0. 4
致死的形成不全	1. 5	NA	> 1
皮膚			
紅斑*	6 - 8 (Gy)	> 30(Gy)	
一過性脱毛*	3 - 5 (Gy)		
永久脱毛*	7 (Gy)	50~60(Gy)	
毛細管拡張症 及び晩発性皮膚萎縮 †		30~40(20)	
早期紅斑 †	≥ 2 (Gy)		

※ 特記するもの(皮膚)の他は ICRP41 表 6、それを踏襲した ICRP60 表 B-1 による。

* 精巣及び骨髄においては、しきい値が全線量でなく、線量率に依存するために、適用できない。

§ Otake & Schll, 1990, † 2-10Sv(NCRP98)

‡ ICRP60[B183]「照射後 5 年での毛細管拡張症と晩発性皮膚萎縮に関するしきい線量は約 30~40Gy である。この線量は、生涯線量約 20Gy に相当する委員会の現行の年線量限度と比べられよう。」

‡ ICRP41 [IV-A]項、表 6 には示されていない。 ¶ ICRP59[61]項

5. 2 確定的影響の RBE

ICRP60[B43~45]は「高 LET 放射線の被曝の結果起こる確定的影響は低 LET 放射線被曝による影響と同様であるが、影響の頻度と重篤度は単位吸収線量あたりにすると高 LET 放射線の方が大きい。これらの違いは、調べようとする影響に関する生物効果比 (RBE) で表現することができる。」また、「確定的影響の RBE は線量に依存し、線量が低くなると増加して、ある放射線とある組織について最大と思われる値 (これを RBE_m と記す。)」になり、「RBE_m は低線量では常に確率的影響の RBE の最大値 RBE_M より小さい」として、これらの放射線については RBE_M に基づき得られた線質係数 Q を用いることは、放射線防護上安全側の考え方である、としている。

NCRP98 及び ICRP58³で引用されているデータのうち、確定的影響のしきい線量の低い生殖腺、水晶体、赤色骨髓、皮膚の障害について表 5-3 に示す。また表中の陽子、重イオンに対する RBE または RBE_m を ICRP60 の Q-L 曲線とともに図 5-1 に示し、中性子については、Siebert らがまとめた中性子入射時の全身、精巣および卵巣の ICRP60 に基づく平均線質係数、並びに ICRU 球の主軸上深さ 1cm の位置の平均線質係数を示すグラフ上に、RBE をプロットした（図 5-2）。なお、広島原爆の中性子については、エネルギー範囲から Atomic Data and Nuclear Tables により反跳陽子の LET を求め、図 5-1 上にプロットした。

これらより、中性子についてはプロットした確定的影響の RBE はすべて全身、生殖腺および ICRU 球の 1cm 深さの平均線質係数より小さくなり、また陽子、重イオンについても、以下の例外を除いては、線質係数より小さい値を示している。

- ・ 広島原爆の水晶体に対する RBE 値が線質係数より大きめの値を示す部分もあること。

〈7〉⁴

- ・ 重イオン C、Ne、Ar に対する水晶体／白内障の RBE 値が LET の広がりから 10keV/ μ m 付近で線質係数 Q より大きく表示されること。〈2-5〉⁴

- ・ Ar による白内障の値が 40 と特に高めの値を示すこと。〈6〉⁴

これらのことから、2章で示したような LET 分布（図 2-8）を持つ宇宙放射線環境を総合して見れば、ICRP60 で示されていると同様に、線質係数 Q（ICRP60 の Q(L)）を用いて確定的影響を評価することは、放射線防護上妥当であると考えられる。

³ ICRP: Pub.58, RBE for Deterministic Effects, Ann.ICRP 20(4), 1989

⁴ 〈 〉 : 表 5-3、図 5-1、図 5-2 の文献No. それぞれの文献については、44 頁に示す。

表 5-3. 陽子、中性子、重イオンの確定的影響のRBE（又は、RBE_m）値

組 織	影 響	線 質	エネルギー(MeV/u)	LET(keV/μ m)	RBE（又はRBE _m ）値	文 献
水晶体	白内障	陽子	160	0.5-100 ^{*1}	RBE=1.09±0.07	〈1〉
		重イオン { C : 400 Ne : 425 Ar : 570		} 10-1500 ^{*2}	RBE=1.5~5	〈2-5〉
		重イオン (Ar)	Ar : 570	100-1500 ^{*2}	RBE=40	〈6〉
		中性子	核分裂(広島原爆) : 0.1~1	25-100 ^{*1}	RBE=18	〈7〉
卵 巢	未成熟 卵母細胞死	重イオン { Si : 670 Ar : 570 Ne : 450		} 10-1500 ^{*2}	RBE=0.4-0.9	} 〈8〉
		中性子	14		RBE=1	
		中性子	0.4		RBE=0.4	
精 巣	精原細胞死	中性子	1 (平均) 2.5 (平均) 5.6 (平均)		RBE _m =5.7 RBE _m =4.6 RBE _m =3.0	} 〈9〉 } 〈10〉
		重イオン { C : 400 Ne : 425 Ar : 570		30-150 ^{*2} 70-300 ^{*2} 200-1500 ^{*2}	RBE=2.0 RBE=2.2 RBE=3.0	} 〈11〉

(続)

表 5-3. 陽子、中性子、重イオンの確定的影響のRBE（又は、RBE_m）値（続）

組 織	影 響	線 質	エネルギー(MeV/u)	LET(keV/μ m)	RBE（又はRBE _m ）値	文 献
赤色骨髓	幹細胞死	中性子	7.5	30-150* ² 20-300* ²	RBE=1.5-2	<12>
		中性子	15		RBE=1.1-1.6	
		重イオン	C : 400 Ne : 425		RBE=1.8-2.0 RBE=1.2-1.8	<13>
皮 膚	早期効果	中性子	2-2.5	10-150* ²	RBE=6-7.5	<14-17>
		中性子	7.5		RBE=4.5	<18>
	晩発効果	中性子	14		RBE _m =4.3	<19>
		中性子	20		RBE _m =4.4	<20>
	早期効果	重イオン	C : 400		RBE _m =3.0	<21-22>

* 1 : J. F. Janni, Atomic Data and Nuclear Data Tables Vol.27(2/3) (1982), 2 : ICRP58[Table 3]

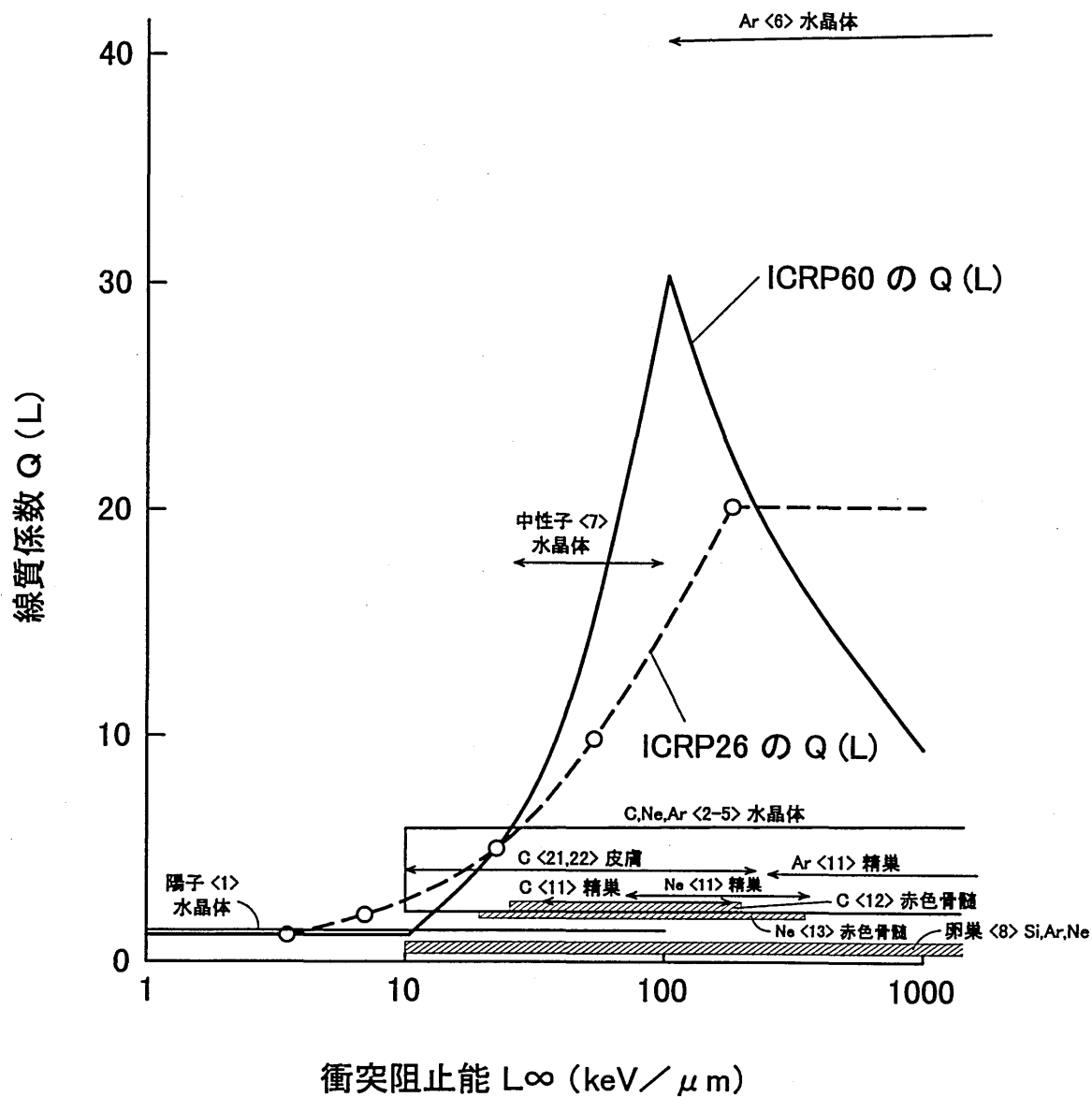
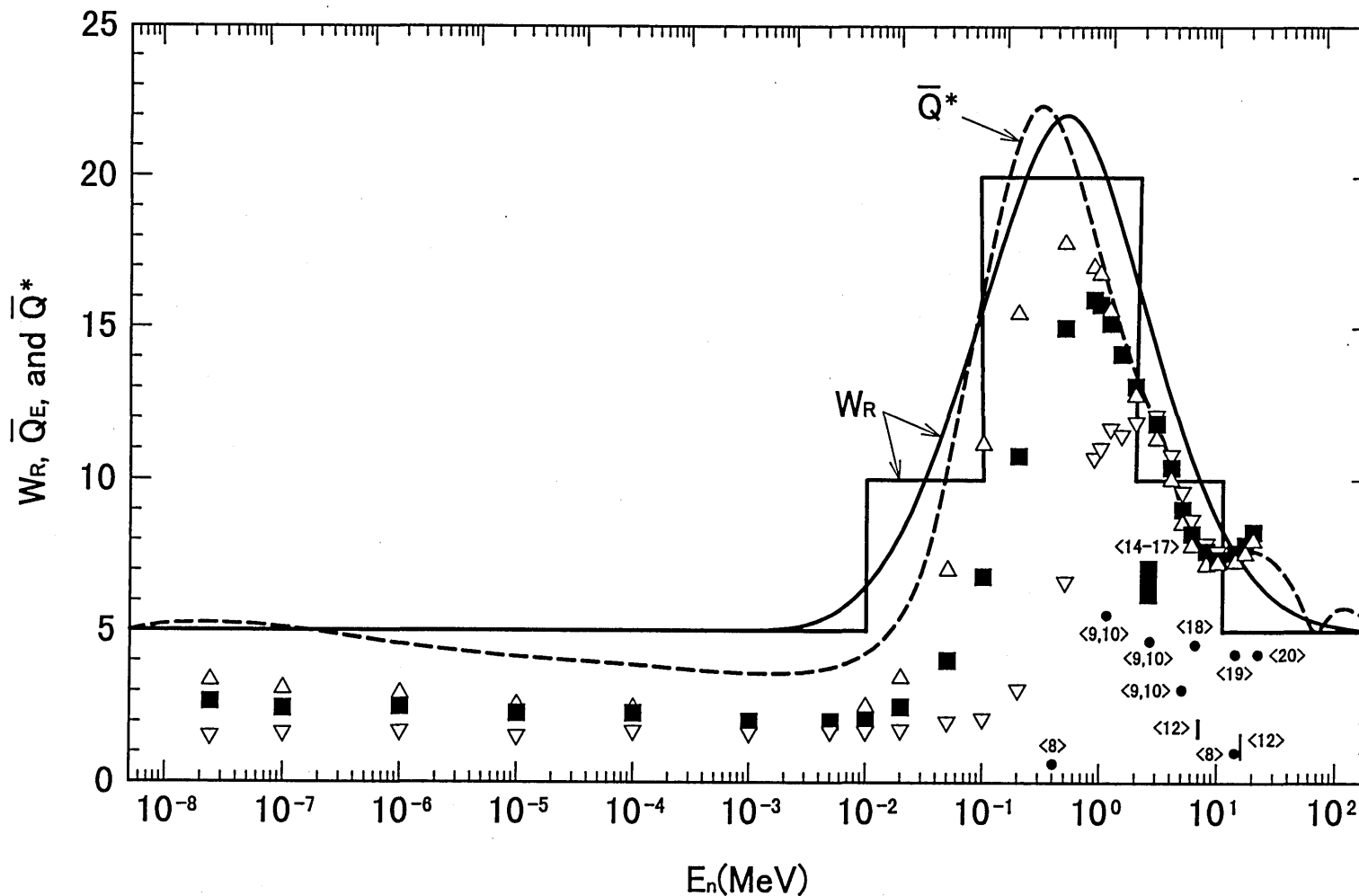


図5-1 陽子、重粒子の確定的影響のRBE値とICRP Publ. 60の $Q(L)$ 値との比較

(注1) 図中の番号は引用文献名

(注2) 参考のためICRP Publ. 26の $Q(L)$ も表示



(Radiat. Prot. Dosi. 54(1994)193, B. R. L. Siebert より引用した。)

図5-2 中性子の確定的影響のRBE (又はRBE_m値)とICRP Publ. 60のQ(L)に基づく
全身及び生殖腺の中性子AP照射の平均線質係数との比較

(注1) 図中の番号は引用文献を示す。

(注2) ■: 全身, △: 精巣, ▽: 卵巣の平均線質係数 (AP照射)

(注3) W_R : 放射線荷重係数

(注4) $H^*_{(10)} / D^*_{(10)}$ はICRU球の主軸上深さ10mmの点の線質係数 (\bar{Q}^*)

文献 (表 5-3、図 5-1、図 5-2 関係)

- 〈1〉 Urano M et al: Relative biological effectiveness of modulated proton beams in various murine tissues, *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 10:509, 1984
- 〈2〉 Cox AB et al: Cataractogenesis from high-LET radiation and the Casarett model, *Adv. Space Res.* 3: 211, 1983
- 〈3〉 Lett JT: Late effects from particular radiations in primate and rabbit tissues, *Adv. Space Res.* 3: 221, 1984
- 〈4〉 Lett JT et al: Some perspectives on cataractogenesis from heavy charged particles, *Radiat. Res.* 104: S201, 1985
- 〈5〉 Lett JT et al: Cataractogenic potential of ionizing radiation in animal models that simulate man, *Adv. Space Res.* 6(11) 295, 1986
- 〈6〉 Merriam GR et al: Accelerated heavy particles and the lens, I. Cataractogenic potential, *Radiat. Res.* 98: 129, 1984
- 〈7〉 菅原 努(監修)、青山 喬 (編): 放射線基礎医学 第 8 版, 金芳堂, 1996, pp291-293
- 〈8〉 Strume T et al: Neutron RBE for mouse oocyte killing. *Radiat. Res.* 94: 644- 645(Abstr.), 1983
- 〈9〉 Gasinska A: Mouse testis weight loss and survival of differentiated spermatogonia following irradiation with 250kV X-rays and 5.5MeV fast neutrons. *Neoplasia* 32: 443-449, 1985
- 〈10〉 Gasinska A et al: Survival of mouse type B spermatogonia for the study of the biological effectiveness of 1MeV, 2.3MeV and 5.6MeV neutrons. *Int. J. Radiat. Biol.* 52: 237-243, 1987
- 〈11〉 Alpen EL: The relative biological effect of high-LET charged particles for spermatogonial killing. *Radiat. Res.* 88:132-143, 1981
- 〈12〉 Broerse JJ et al: Relative biological effectiveness of fast neutrons for effects on normal tissues. *Current Topics in Radiation Research Quarterly* 8: 305-350, 1973
- 〈13〉 Leith JT et al: Heavy ion radiobiology: normal tissue studies. In: *Advances in Radiation Biology*, Vol. 10, pp.191-236(J.R. Lett and H. Adler, eds). Academic Press, New York., 1983
- 〈14〉 Atkins L et al: Dose-rate effects on RBE of californium and radium reactions of pig skin. *Radiology* 103: 439-446, 1972
- 〈15〉 Joiner MC et al: The RBE for mouse skin irradiated with 3MeV neutrons: single and fractionated doses. *Radiat. Res.* 95:130-141, 1983
- 〈16〉 Joiner MC et al: The effect of small radiation doses on mouse skin. *Br. J. Cancer*, Suppl. VII, 53: 63-66, 1986
- 〈17〉 Joiner MC et al: The response of mouse skin to irradiation with neutrons from the 62 MV cyclotron at Clatterbridge, U. K. *Radiother. Oncol.* 12: 153-166, 1988
- 〈18〉 Field SB et al: Aspects of OER and RBE relevant to neutron therapy. In: *Advances in Radiation biology*, pp. 1-50(J. Lett and H. Adler, eds). Academic Press (1979)
- 〈19〉 Battermann JJ: Results of d+T fast neutrons on advanced tumours of bladder and rectum. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 8: 2159-2164, 1982
- 〈20〉 Hussey DH et al: 50MeV(d-Be) neutrons: a comparison of normal tissue tolerance in animals with clinical observations in patients. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 8: 2083-2088, 1982
- 〈21〉 Leith JT et al: , Response of the skin of hamsters to fractionated irradiation with X-rays or accelerated carbon ions. *Radiat. Res.* 88:565-576, 1981
- 〈22〉 Raju MR: Heavy Particle Radiotherapy. Academic Press, New York, 1986

〈1〉 ~ 〈6〉 : cited in NCRP98、 〈8〉 ~ 〈22〉 : cited in ICRP58

5. 3 確定的影響の防護

5. 3. 1 宇宙飛行士の確定的影響防護の考え方

地上における確定的影響の防護は、全身の線量の制限により、それが限度値で長期間続いたと仮定しても、ほとんどすべての組織・臓器に確定的影響をおこさないことは確実であるとし、それだけでは必ずしも十分とはいえない組織についてしきい値を越えないように組織線量限度を設定することにより実施されている⁵。

これは、地上における放射線防護は、確率的影響のリスクを年間実効線量限度を設けて管理することにより行っており、この年間の限度と組織荷重係数 (w_T) の関係により、すべての放射線環境で、一部の組織／臓器を除き、ほとんどすべての確定的影響を防護できることによっている。

一方、毎年定常的な被曝をしない宇宙飛行士の確率的影響のリスクは、4章で述べたように、生涯の線量を制限することにより地上の放射線業務従事者等のリスクと同程度に抑えることが妥当である。そのため、例えば年間実効線量当量限度のような全身の限度により、地上の放射線防護と同様に、変動する宇宙放射線環境における確定的影響を確実に防護しようとするれば、その年間実効線量当量限度は宇宙飛行士にとって不必要に厳しい値となる。このため、宇宙飛行士の確定的影響の防護を実施するためには、それぞれの影響のしきい値と宇宙ステーション宇宙飛行士の推定線量を比較して、またその他の宇宙環境の人体への影響をも加味して、飛行中及び飛行後に起こりうると考えられる影響について組織線量限度を設定することが妥当であると考ええる。

ただし、地上の放射線防護と異なり、宇宙飛行士は限られた少数の個人であり、宇宙飛行計画の立案にあたっては各宇宙飛行士の意思を勘案することが可能である。そのため、限度を設定し、それをすべての宇宙飛行士に一律に適用することが、宇宙飛行士の活動を過度に制限することになる場合には、限度を設定せず、本人の意思に十分留意して毎回の飛行計画の立案をすることが妥当であると考ええる。しかし、その場合でも、個人の意思、価値観はその生活・状況とともに変化するものであるので、不可逆的な影響はその如何を問わず回避すべきである。

⁵ ICRP60[171~173]

5. 3. 2 宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定値と確定的影響のしきい値との比較

5. 3. 2. 1 通常の船内環境における組織線量当量推定値との比較

通常の船内環境における予測線量と確定的影響のしきい値を比較するため、確率的影響の考察により導き出された宇宙ステーション宇宙飛行士の生涯被曝線量限度まで被曝した場合及び1年間宇宙ステーションに滞在した場合のそれぞれの組織線量当量の推定値を表5-4に示す。

表中の範囲は太陽活動極大期/極小期、船壁厚アルミ 67.17mm/9.5mm、すなわち4つのケースの最大～最小を示す。

表 5-4. 通常の船内宇宙放射線環境における組織線量当量推定値

	生涯 (mSv) *	年間 (mSv/年)	1日 (mSv/日)
組織線量当量			
精巣	1000～1370	180～1020	0.5～2.8
卵巣	420～540	110～350	0.3～1.0
水晶体	1030～1400	190～1040	0.5～2.9
骨髓	900～1100	170～820	0.4～2.3
皮膚	1080～1530	200～1150	0.5～3.2
実効線量当量	1200(男)、1100(女)	220～900	0.6～2.5

* : 卵巣は実効線量当量 1100mSv (女、 ≥ 40 歳)の場合
 その他は実効線量当量 1200mSv (男、 ≥ 40 歳)の場合

これを表 5-2 の「しきい値」と比較する。

卵巣、水晶体、皮膚についてはしきい値が全線量に依存するとされており、生涯実効線量当量限度まで被曝した場合の組織線量当量は、表 5-2 のいずれのエンド・ポイントについても多分割/遷延被曝で受けた全線量当量のしきい値を下回る。

一方、しきい値が線量率に依存するといわれる骨髓、精巣については、1年間の宇宙ステーション滞在の場合、多分割/遷延被曝を多年にわたり毎年受けた時の年線量率のしきい値にまで至る可能性があるため、別添1、別添2においてさらに検討を加えた。

5. 3. 2. 2 SPE 時及び船外活動時における組織線量当量推定値との比較

1972 年規模の太陽フレア時全期間及び船外活動時における各組織・臓器の組織線量当量の推定値をそれぞれ表 5-5、及び表 5-6 に示す。

これを表 5-2 の「しきい値」と比較する。

太陽フレア等 SPE 時には一時的な被曝線量の増加が起こることから、しきい値との比較に際しては 1 回短時間被曝のしきい値と比較することが適当であると考え。2.3.2.2 項で述べたとおり、実際の 1972 年規模の太陽フレア時に受ける線量は、計算により求めた表 5-5 の太陽フレア時の組織線量当量推定値より大きいことも想定されるが、この規模の太陽フレア時の各組織・臓器の組織線量当量が、1 回短時間被曝のしきい値を越えることは殆どなさそうに思われる。しかし、船外活動時に太陽フレア等の SPE に遭遇する、より巨大な太陽フレアが発生する等の可能性も現段階では否定しきれないため、太陽フレア時に 1 回短時間被曝のしきい値を越える可能性は必ずしも無視できない。

船外活動時には、実効線量当量で船内環境において被曝する線量の 2～3 倍の値を被曝し、1 回の船外活動(8 時間以内)によって船内における 1 日分を受けることが想定される。特に体表面に近い水晶体及び皮膚については実効線量当量に比べ組織線量当量が数倍程度大きくなる。これらのことから船外活動を伴う宇宙ステーション長期滞在で生涯実効線量当量限度まで被曝した宇宙飛行士が水晶体、皮膚の遷延被曝で受けた全線量のしきい値を越える可能性は否定しきれない。また、水晶体については、実効線量当量を算出する際に考慮されていない(w_T が設定されていない)ことから、5.4 項においてさらに検討を行うこととする。

卵巣については、通常の船内宇宙放射線環境、SPE 時および船外活動時のいずれの場合も組織線量当量は実効線量当量を下回り、また、しきい値と線量の推定値との間に開きがあることから、組織線量限度設定の必要はないと考えられる。

表 5-5. 1972 年規模の太陽フレア時全期間における組織線量当量の推定値

組織・臓器	照射条件			
	船壁厚アルミ 67.17mm		船壁厚アルミ 9.5mm	
	前方照射	後方照射	前方照射	後方照射
実効線量当量 (H_E) (mSv)	5.2		12.3	
組織線量当量 (H_T) (mSv)				
精巣	8.0	2.5	17.7	5.9
卵巣	2.5	2.4	5.7	5.7
水晶体	8.2	3.0	16.7	7.5
骨髓	3.8	5.4	9.3	14.4
皮膚	6.1	6.0	13.2	13.2

表 5-6 船外活動時における組織線量当量の推定値

太陽活動	極大				極小			
Al 厚さ	0.2g/cm ²		0.5g/cm ²		0.2g/cm ²		0.5g/cm ²	
照射条件	前方	後方	前方	後方	前方	後方	前方	後方
実効線量当量 (H_E) (mSv/日)	2.0		1.7		3.3		3.0	
組織線量当量 (H_T) (mSv/日)								
精巣	4.1	0.66	3.5	0.64	7.1	1.1	6.5	1.1
卵巣	0.67	0.43	0.66	0.41	1.1	1.1	1.1	1.1
水晶体	3.7	0.80	3.3	0.79	7.1	1.3	6.4	1.3
骨髓	1.5	1.9	1.3	1.8	2.4	3.6	2.3	3.4
皮膚	13.6	13.6	5.0	5.0	10.0	10.0	5.6	5.6

5. 4 組織線量限度

5. 4. 1 提案する組織線量限度

組織線量限度の設定にあたっては、5.3.1 項に示した考え方に基づき、ICRP41 等の文書に示されている「しきい値」に準拠することが妥当と考え、提示する案を表 5-7 に示す。

表 5-7. 宇宙放射線被曝管理における組織線量限度(案)

組織・臓器	1 回短時間 [¶] (Sv)	1 年間 (Sv/年)	生涯 (Sv)
精巣	—	2	—
水晶体	0.5	1	5
骨髄	—	0.5	—
皮膚	2	4	20

¶ : ここで、1 回短時間とは 1 回の SPE の全期間中等、宇宙環境の変動または宇宙飛行士の滞在状況の変化により一時的に被曝線量が高くなる期間を指す。

5.3.2 項の検討において設定の必要性を認めなかった卵巣を除き、組織・臓器別に検討した点は以下の通りである。

① 精巣

5.3.2 項で考察したとおり、精巣の確定的影響は、そのしきい値と宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定値を比較するに、1 年間の宇宙ステーション滞在では、起こりうると考えられる。

しかし、受胎の意思は、個人の年齢、価値観、それらに基づく人生設計に依存するものであり、また、精巣の一時的不妊のしきい値は他の年間のしきい値に比べ低く、これを線量限度としてすべての宇宙飛行士に一律に適用して、宇宙飛行士の活動を制限することは必ずしも妥当とは考えられない。

一方、【別添 1】に示す通り、最近の放射線治療の経験から、ICRP41 の示す年間のしきい値 400mSv を下回る精巣線量によっても精子数の有意な減少が報告されているが、精巣線量数百 mSv 程度による精子の減少は長期間を要するとはいえ回復が確認されている。

更に、NCRP98 は、一時的不妊について、「回復能はよく立証されている。これらの理由から、この影響に対しての生涯線量当量限度は掲載されていない。しかし不妊症誘発のしきい値であると現在考えられている線量については、本報告書で防護目的の指針として考察している。」⁶としている。

これらのことから、ICRP41 の精巣／一時的不妊のしきい値、すなわち、1 回短時間：

⁶ NCRP98[1.8]

0.15Sv、1年間：0.4Svを参考レベルとして設定し、個々の宇宙飛行士に対し正確な情報提供を行った上で、宇宙飛行士本人の意思に十分留意した宇宙飛行計画を立案することが適切であると考ええる。

また、次世代への影響を含めた情報提供のあり方、本人の意思の確認等については、今後さらに検討を加え、健康管理に遺漏なきよう努めるべきと考ええる。

しかし、個人の意思、価値観は、生活・状況とともに変化しうることから、不可逆的影響を確実に回避するため、ICRP41の永久不妊のしきい値を精巣の年あたりの組織線量限度として設定する。ここで、精巣の1回短時間のしきい値は年間のしきい値より高く、これを線量限度として設定しても、実運用で用いられることが想定されにくいいため、1回短時間の限度は設定しないこととする。また、精巣の確定的影響のしきい値は線量率に依存するため、生涯の線量限度についても設定しない。

② 水晶体

5.3.2項で考察したとおり、水晶体の確定的影響は、そのしきい値と宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定値を比較するに、船外活動を伴う宇宙ステーションへの長期滞在を生涯実効線量当量限度付近まで被曝した場合、起こる可能性は無視できない。また、水晶体は実効線量当量の算出に考慮されていない（ w_T が与えられていない）組織である。

ICRP41 Table.6が示している検知可能な混濁のしきい値0.5～2.0Svは原爆被爆生存者の眼科学的検査によって検出する混濁の頻度を増加させる低LET放射線のしきい値から与えられたものであり、水晶体混濁は一般集団においても加齢とともに増加する、いわば老化現象であり、重篤な疾患とは言えず、これを基に限度設定の必要はないとする考え方もあり得よう。

しかし、不可逆的影響を確実に回避すべきとの原則に従い、かつ宇宙放射線を構成する中性子、重イオンの白内障に係るRBEに関して、ICRP60の線質係数 $Q(L)$ より高い値も報告されていること(図5-1)、比較的若年の宇宙飛行士に水晶体混濁が生じた場合に加齢によって白内障まで至る可能性を考慮し、上記「検知可能な混濁」のしきい値によって限度を設定することとする。

水晶体の確定的影響は、全線量に依存するとされていることから、表5-2の多分割遷延被曝で受けた全線量のしきい値を生涯の線量限度として設定する。また、SPE時等に1回短時間被曝のしきい値を越える可能性を考慮し、そのしきい値をもって1回短時間の線量限度とする。

ICRP60は水晶体について、多分割/遷延被曝で受けた全線量のしきい値を労働期間を通

じ、分割して受けることを想定し、30～40 で除した値を年間組織線量限度として勧告していると考えられる。これに対し、宇宙ステーション滞在による被曝については長期滞在が最大でも5回程度と考えられることから、ICRP41 の多分割/遷延被曝で受けた全線量のしきい値を5で除した値を年間組織線量限度とすることが妥当であるとする。

③ 骨髄

【別添2】に示す通り、最近の悪性腫瘍に対するR I治療の経験から、放射線感受性の高い白血球/血小板の減少は骨髄線量>600mSvにおいて見られ、数百 mSv レベルの骨髄線量による白血球/血小板減少は自然回復が確認されている。

これらは悪性腫瘍患者における所見であるが、回復が確認されており、健康な宇宙飛行士においては骨髄線量数百 mSv 程度によっては少なくとも臨床的に問題となる骨髄抑制は生じず、仮に生じたとしても回復すると考えられる。しかし、宇宙ステーションにおける放射線以外のファクター、すなわちストレスや無重量等による白血球分画、リンパ球分類等、血液学的、免疫学的変化に関する報告が数多くなされており、ミッション期間中または帰還後に免疫能力の低下等の影響も想定される(【別添3】参照)。

これらのことから、飛行中または飛行後の血球数の減少等による影響を回避するため、表 5-2 の骨髄の造血能低下のしきい値を考慮し、骨髄の組織線量限度を設定することとする。ここで、骨髄のしきい値は①精巣と同様に線量率に依存するため、表 5-2 の年線量率のしきい値「>400mSv」と上記【別添2】の「>600mSv」より、骨髄の年組織線量限度として500mSv/年を提示することとする。

また、①精巣の場合と同様の理由により、1回短時間および生涯の組織線量限度は設定しない。

④ 皮膚

皮膚の確定的影響の多分割/遷延被曝で受けた全線量のしきい値で最も低い毛細血管拡張症及び晩発性皮膚萎縮は、5.3.2 項で示したとおり、しきい値と宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量推定値を比較するに、船外活動を含む宇宙ステーション長期滞在では、多分割遷延被曝で受けた全線量のしきい値を越える可能性は無視できない。また、1回短時間被曝のしきい値が最も低い早期紅斑についても、巨大太陽フレアの発生やその際の宇宙飛行士の状況等によっては、その1回短時間被曝のしきい値を越える可能性も否定しきれないとする。

晩発性皮膚萎縮は数週間から十数週間後に現れる皮膚の表面の萎縮で、不可逆的な影響であり、またそのしきい値は多分割遷延被曝で受けた全線量に依存することから、そのし

きい値により生涯組織線量限度を設定する。ICRP60 では皮膚の組織線量限度設定に全線量 20Sv を用いていることから、これをもって生涯の皮膚組織線量限度とする。年間組織線量限度については、②水晶体と同様に、これを5で除した値とする。

一方、皮膚の早期紅斑のうけとめ方は個々の価値観に依存し、それも一時的な症状ではあるが、通常の宇宙ステーション運用においては、早期紅斑のしきい値は十分に大きく、これを一律にすべての宇宙飛行士へ適用することは、過度にその活動を制限することにはならないと考える。よって、皮膚の1回短時間の組織線量限度を、そのしきい値 2 Sv により設定する。

5. 4. 2 組織線量限度の運用

5.4.1 項に提示した組織線量限度(案)は、ICRP41 等の文書に準拠し、宇宙飛行士が宇宙ステーションに長期滞在する上での最大限受容可能なレベルを示したものであり、これに加えて、個々の宇宙飛行士の飛行計画立案時に参考にすべき値を参考レベルとして提示した。

4.4 項において提示した生涯実効線量当量限度と異なり、組織線量限度は、年間ないし1回短時間の限度を含むことから、国際宇宙ステーション計画参加各極の合意のもとに運用の実行を図らねばならないものである。そのため、各極との調整により、運用に当たっては ALARA 原則⁷に則り被曝線量を低減することにより、重篤な確定的影響は絶対に回避することはもとより、軽微なものといえども可及的に回避すべく努めるべきことは論を俟たない。また、特に、巨大 SPE 等現段階において予想できない突発的な事象により、組織線量限度に近づく、または越える可能性のある事態に備え、運用手順／体制等について国際間で合意を図ることが必要である。

⁷ ALARA: as low as reasonably achievable, 放射線の被曝は、合理的に達成できるだけ低く抑えなければならない、という放射線被曝管理の基本原則。

6. 今後の課題

以上に、当分科会においてこれまで議論してきた宇宙ステーション宇宙飛行士の被曝線量限度案を提案した。最初にも述べたとおり、これは宇宙ステーション宇宙飛行士にとって当分科会で容認可能と認め得るレベルを示したものであり、本中間報告書の公表等により、これらの考え方に対し広く意見を問ひ、必要があればさらに検討を行いたいと考えている。

また、宇宙ステーション宇宙飛行士の宇宙放射線被曝管理においては、地上における被曝管理と同様に、線量限度の設定だけでは十分ではないことを当分科会では認識している。当分科会では、更に下記の課題について調査・検討を行い、宇宙飛行士が宇宙ステーションで長期滞在するにあたり必要な、宇宙放射線被曝管理指針の策定に協力してゆきたい。

- モニタリングと線量評価手法について
- 教育・訓練、合意等の必要要件について
- 放射線障害防止のための健康管理について

【謝辞】

本中間報告書をまとめるにあたって、以下の各位よりご意見を賜り、参考にさせていただいた。
ここに感謝の意を表したい。

東北大学 坂本 澄彦 名誉教授

新潟大学 酒井 邦夫 教授

早稲田大学 道家 忠義 名誉教授

九州大学 増田 康治 教授

東京大学大学院 鈴木 紀夫 教授

京都大学 池永 満生 教授

また、図の使用の許諾をいただいた、日本原子力学会及び Pergamon Press に感謝する。

用語集

頁*: 初出又は説明のある頁

斜字: 用語解説のある項目

用語	頁*	解説
AE8モデル	8	1983年人工衛星Azur等での計測データをもとにNASAで開発された捕捉放射線帯内の電子のフラックスを表すモデル。
AP8モデル	8	1976年人工衛星Azur等での計測データをもとにNASAで開発された捕捉放射線帯内の陽子のフラックスを表すモデル。
CREMEコード	4	1981年から1986年にかけて発表された、人工衛星HEAO-3による計測データをもとに開発された銀河宇宙線および太陽フレア粒子のフラックスを表すモデル。また、CREMEは、アルミ中の1次粒子の減衰を取り扱うこともできる。
DDREF (線量・線量率効果係数)	20	高線量・高線量率における観察から低線量・低線量率における確率の推定値を得るために用いる比例計数。ICRP60は2を用いている。 ICRP60[74]
EGS4コード	11	電子の物質中での反応を計算するためのコードで、二次光子の発生を含む電磁シャワーを取り扱うことができる。
EVA	13	Extra-Vehicular Activity、船外活動(宇宙遊泳)。
GCR	4	Galactic Cosmic Rays、銀河宇宙線。
HERMESコード	8	陽子の物質中での反応をモンテカルロ法によって計算するための計算コードで、核反応、二次粒子生成、減衰を取り扱うことができる。
HZE粒子	4	high-Z and high energy particles、高エネルギー重荷電粒子。
ICRP	1	International Commission on Radiological Protection、 国際放射線防護委員会。
ICRU		International Commission on Radiation Units and Measurements、 国際放射線単位・計測委員会。
ICRU球	39	国際放射線単位・計測委員会(ICRU)が規定する直径30cmの組織等価球状ファントム。 元素組成は、酸素76.2%、炭素11.1%、水素10.1%、窒素2.6%。
LET	11	放射線が単位距離を通過するさいに物質に付与するエネルギー。 線エネルギー付与、Linear Energy Transfer
MIR	14	1986年に打ち上げられたロシア(旧ソ連)の有人宇宙ステーション。
MIRD-5ファントム	13	米国核医学会内部被曝委員会(Medical Internal Radiation Dose Committee)により採用され、パンフレットNo.5として発表された人体数学ファントム。標準的な男性を模擬したものに女性特有の器官(女性生殖器、乳房)を追加したもので男性と女性の双方の身体的な特徴をもつ。
NCRP	1	National Council on Radiation Protection and Measurement、 米国放射線防護測定審議会。
NIH	22	National Institute of Health、米国国立衛生研究所。
RBE	38	Relative Biological Effectiveness、生物効果比。
RRMD	11	NASDAで開発されたSi半導体検出器型のLETスペクトロメーター。 Real-time Radiation Monitoring Device
SAA	8	south atlantic anomaly、南大西洋異常。
SEERプログラム	22	米国立がん研究所(NCI)が1971年から行っているがんの発生率、死亡率、生存率等に関する調査。対象は全米人口の14%にあたる。 Surveillance, Epidemiology, and End Results
SPE	4	Solar Particle Event、太陽粒子現象。
sr	4	立体角の単位:ステラジアンを表す記号。

用語	頁*	解説
STS	11	宇宙往還システム(Space Transportation System)、いわゆるスペースシャトルは、1981年4月の初飛行以来、ミッションの計画順にSTS-No.と番号が付されている。
TEPC	11	NASAで開発された組織等価ガス比例計数管型のLETスペクトロメーター。 Tissue Equivalent Proportional Counter
Van Allen帯	8	捕捉放射線帯の別名。
X線	4	高速電子の原子への衝突等に伴い発生する電磁波。別名レントゲン線。電離放射線の一種。
α 線	4	Heの原子核(2個の陽子と2個の中性子からなる粒子)のビーム。電離放射線の1種。
γ 線	4	原子核や素粒子のエネルギー準位の遷移等により発生する波長の短い電磁波。電離放射線の一種で、X線と比べると透過力は強く、電離作用は小さい。
δ 線	16	高速荷電粒子の電離作用によりたたき出された高エネルギー二次電子。
おおぞら	8	文部省宇宙科学研究所が1984年に打ち上げた第9号科学衛星(EXOS-C)。高度865~354km、傾斜角75度の楕円軌道。
がん	16	悪性腫瘍は次のように分類されるが、本報告書においては、ICRP60等に倣い、「がん」と総称する。 ・がん: 上皮細胞由来、(例)皮膚がん、胃がん ・肉腫: 非上皮細胞由来、(例)骨肉腫、白血病
がん死亡率	18	がん(悪性新生物)が原因によって死亡する死亡率。
クローン	18	単一細胞を起源とする細胞群。
スペースハブ	14	スペースシャトルに搭載する実験用圧モジュール。
ファントム	13	人体等における放射線の挙動を計測するための等価物質。シミュレーションモデルを「数学ファントム」という。
モンテカルロ法	13	偶然現象の経過を乱数を用いて数値的に実現させて、問題の近似解を得る方法。
過剰相対リスク係数	18	相乗モデルにおける比例定数。単位線量あたりの過剰相対リスク。 ICRP60[C36~50]
確定的影響	36	左記頁参照。
確率的影響	18	左記頁参照。
軌道傾斜角	13	人工衛星軌道面の赤道に対する角度。
吸収線量	11	放射線被曝の大きさを表す量。放射線により臓器等に付与される単位質量あたりのエネルギー。単位: Gy(グレイ)。
寄与生涯がん死亡確率	18	放射線被曝の寄与によりがんで死亡する確率を生涯にわたって積分したもの。生涯にわたってがんで死亡する確率の、放射線の寄与による増加分。
国際宇宙ステーション計画	1	カナダ、欧州宇宙機関(ESA)加盟国、日本、ロシア及び米国の協定に基づく民生用宇宙ステーション計画。1998年11月に軌道上での組立が開始され2004年に完成予定。日本は実験棟(JEM)を提供する。常時7名の宇宙飛行士が滞在可能で、日本人は2002年から滞在権利を生じる。
国際放射線単位・計測委員会(ICRU)	39	放射線の量及び単位並びに計測法に関する勧告を行う国際委員会。
国際放射線防護委員会(ICRP)	1	放射線防護に関する勧告を行う国際委員会。国際放射線医学会議(ICR)の決定により、1928年に国際X線・ラジウム防護委員会として設立され、1950年に現在の名称に変更された。我が国をはじめ、多くの国で放射線防護に関する法令はその勧告に準拠している。
死亡率	18	ちょうどx歳に達した者が、 $x+q(1,5,etc.)$ 歳に達しないで死亡する確率。特に $q=1$ の場合を「X歳の死亡率」という。

用語	頁*	解説
死亡率(全死因)	18	全ての原因によって死亡する死亡率。混乱の恐れのない場合には単に「死亡率」という。
自然がん死亡率	18	放射線に被曝していない者のがん死亡率。一般には全人口のがん死亡率を用いる。
自然死亡率(全死因)	18	放射線に被曝していない者の死亡率(全死因)。一般には全人口の死亡率(全人口)を用いる。
実効線量	11	各臓器別の等価線量をそれぞれ臓器毎に組織荷重係数で重みづけして、それらを合計したもの。放射線荷重係数に基づいた全身の平均的な被曝量を表す。
実効線量当量	11	各臓器別の線量当量をそれぞれ臓器毎に組織荷重係数で重みづけして、それらを合計したもの。線質係数に基づいた全身の平均的な被曝量を表す。本報告書ではICRP60の線質係数、組織荷重係数で計算される値を指す。
人体数学ファントム	13	人体を構成する主要な臓器や組織を、円柱や球等の基本的な立体の組合せにより模擬した数学ファントム。
生物効果比(RBE)	38	ある特定の生物学的影響について同じ程度の結果を生ずるのに必要な基準放射線の吸収線量と試験放射線の吸収線量の逆比。基準放射線としては、通常X線または γ 線(250kVpX線、60Co γ 線)が選ばれる。
線形モデル	20	反応が線量に比例するとする線量反応関係。
線形二次モデル	20	反応が低線量域では線量に比例し、次いで線量の二乗に比例する部分が加算されるとする線量反応関係。 ICRP60[73,B55]
線質係数	11	放射線の影響はその線質に依存するため、線質による影響の違いを補正するための荷重係数。LETの関数として表され、無次元。
線量当量	13	放射線被曝の大きさを表す量。吸収線量を線質係数で重みづけしたもの。単位:Sv(シーベルト)。本報告書では、ICRP60の線質係数を用いて計算される値を指す。
線量反応関係		線量と反応(発がん等)の数量的表現。 ICRP60[62~74,B53~61]
組織荷重係数	11	確率的影響の起こる確率は臓器・組織ごとに異なるので、その違いを補正するための荷重係数。ICRP60によって、各臓器毎に値が定義されている。
相加モデル	21	放射線に被曝した者の誘発がんの過剰数が自然発生率と関係なく一定と仮定する予測モデル。「絶対予測モデル」ともいう。 ICRP60[77,B77~78]
相乗モデル	21	放射線に被曝した者の誘発がんの過剰数が自然発生率の定数倍と仮定する予測モデル。「相対予測モデル」ともいう。 ICRP60[76,B77~78]
太陽風	4	太陽の上層大気(コロナ)が太陽の重力を振り切って流れ出て生じる電離した粒子の風。最も外側の惑星である冥王星の軌道よりずっと外まで吹いていると考えられている。
中性子	4	原子核を構成する粒子の1種で、電荷は0。質量は陽子にほぼ等しい。
電子	4	原子を構成する素粒子の1種で、電荷は負で、陽子の電荷と逆符号(負電荷)で等しい。電子と質量等は同じで電荷が逆の粒子を陽電子と呼ぶ。
電離放射線	4	物質に電離作用を及ぼす粒子(光子を含む)のつくるビーム。
等価線量	13	放射線被曝の大きさを表す量。吸収線量を放射線荷重係数で重みづけしたもの。単位:Sv(シーベルト)
二次モデル	20	反応が線量の二乗に比例するとする線量反応関係。
白血病	21	造血組織、血液中の異常白血球が進行性に増殖する疾患。

用語	頁*	解説
微分 エネルギースペクトル	4	横軸にエネルギー、縦軸にそのエネルギーに相当する粒子の数を表したグラフ。これに対し、積分スペクトルは、縦軸がそのエネルギー以上の粒子数の総和を表す。
平均余命	19	x歳における生存者がx歳以降に生存する年数の平均値を、x歳における平均余命という。
米国放射線防護測定審議会(NCRP)	1	放射線防護並びに計測及び単位に関する知見を収集、検討、周知し、勧告を行う非営利団体。1964年に認可法人となった。
放射線荷重係数	11	RBEをもとにICRP60で示されている放射線の線質の違いを表すための荷重係数。放射線の種類とエネルギー別に定義されている。
予測モデル	20	放射線に被曝した者が一部生存している場合、例えばがんの生涯リスクを予測するモデル。 ICRP60[81,B77~78]
陽子	4	原子核を構成する粒子の1種で、電荷は電子の電荷と逆符号(正電荷)で等しい。水素の原子核は陽子1個のみからできている。

低線量による造精機能抑制

1. 調査事項

低線量における造精機能抑制に関する知見について調査した。

2. 調査方法

ICRP41 は 1984 年に刊行され、その最も新しい引用文献の刊行年は 1982 年であることから、その後の知見について、主として米国国立医学図書館の MEDLINE による系統的な文献検索を行い、その抄録から有用と考えられるものについて、可能な範囲で原本を入手した。

2. 1 放射線治療からの知見

検索された文献の多くは、悪性腫瘍の放射線治療に伴う影響に関するもので、精子数の推移を追跡したものもある。

しかし、宇宙放射線被ばくによる影響を推測するには次のような難点がある。

(ア) 悪性腫瘍そのものの影響

(イ) 併用する化学療法の影響

(ウ) 線量が大きい

(エ) 内部照射の場合、投与量からの吸収線量への換算の精度

早期のセミノーマ等においては患側の精巣摘除後、傍大動脈及び患側骨盤リンパ節に放射線照射を行う治療が行われている。

そのうち、化学療法を併用せず、健側精巣の遮蔽などにより比較的精巣線量が低い患者の精子数等を追跡した調査は表 1 の通りである。

表1. 患側精巣摘除後、放射線照射治療を行ったセミノーマ患者の追跡調査(総括表)

著者・年 ^①	対象数	照射法 ^④	遮蔽	測定法	精巣線量
HA82 ^②	17 ^③	3200rad ^⑤ 16分割/4週	five half-value thickness of lead	TLD-700LiF又は TLD-100 powder capsule	19~114rad
SC88 ^③	11	25~35Gy ^⑥ /3~4週間	照射野の外 に出すのみ	TLD-100LiF 1×1×1mm rods	0.34~.95Gy
CE94 ^④	8 ^③	分割 ^⑦	“clam shell”	(LiF)TLD	28~90cGy
MA86 ^⑤	13 ^③	30~61.6Gy 25分割/5~6週	種々	TLD powder	0.4~5.0Gy

① 筆頭著者の頭2文字、発表年の下2桁。以下この略号で引用する。

② うち、Hodgkin 病-3人、リンパ肉腫-1人。

③ 他に、過去の9症例(精巣線量 116~260cGy)を紹介。

④ MA86 の一部を除き、傍大動脈及び患側骨盤リンパ節

⑤ 6MV X-ray

⑥ 6MeV linear accelerator

⑦ 10又は18MV linear accelerator、線量及び照射期間の記載なし。

⑧ 照射後の精子染色体異常に関する報告(「補遺」参照)。詳細な精子数追跡の記載はないが、「造成能は健側精巣線量の大きい3名を除き回復している。」と記載されており、各症例の精子線量(Gy)は次の通りである。

0.8、0.9、0.4、3.1、0.5、1.6、0.8、1.0、1.3、5.0、0.6、2.4、ND

⑨ うち、リンパ腫、奇形種、直腸がん、Hodgkin 病、髄芽腫、各1。

2. 2 放射線照射後の精子数等の変遷

表1.に示した3つの報告(HA82、SC88、CE94)の放射線照射後の精子数等の変遷を表2、表4、表5にそれぞれ示す。また、HA82において照射後の受胎状況がまとめられているので表3に示す。

表2. 放射線治療後の精子数の推移(Hahn '82¹⁾)

No*	年齢	精巣 線量(rad)	治療開始後の期間(週)				精子数($\times 10^6/\text{cm}^3$)	
			最終精 子検出	初回 無精子	最終 無精子	回復 開始	回復 最高値	治療前
①	29	ND	0	not seen	not seen	not seen	130.0	146.0
②	33	3 3	3	not seen [†]	3 0	3 0	26.0	15.0
③	25	3 2	not seen	not seen [†]	3 6	3 6	59.0	not seen
④	29	5 6	3 0	not seen [†]	4 1	4 1	31.0	57.0
⑤	25	9 6	1 7	2 9	2 9	4 5	2.0	94.0
⑥	34	ND	1 2	3 0	3 0	4 6	49.0	35.0
⑦	32	7 0	3	1 9	3 1	4 7	20.0	16.0
⑧	24	ND	1 4	2 7	4 1	5 5	43.0	30.0
⑨	27	1 1 2	3	2 6	2 6	6 4	42.0	45.0
⑩	27	8 7	1 0	3 1	5 1	7 1	0.1	1.0
⑪	34	ND	0	2 6	7 1	7 4	0.5	0.1
⑫	35	7 7	0	1 2	6 6	8 0	10.0	22.0
⑬	32	8 6	3	1 0	3 2	not seen	not seen	4.0
⑭	26	1 1 4	0	1 5	5 9	not seen	not seen	75.0
H1	24	1 9	4	not seen [†]	2 1	2 1	2.5	7.0
H2	32	6 5	6	not seen	not seen	not seen	40.0	2.0
H3	32	1 1 8	4	1 3	not seen	5 6	45.0	150.0
LS	33	1 4 8	0	2	7 0	8 8	40.0	1.0

* : ①~⑭: セミノーマ, H1~H3: Hodgkin 病, LS: リンパ肉腫

ND: 線量測定せず。†: 乏精子($20\sim 300/\text{cm}^3$)は検出

なお、このうち4人が照射後に自然受胎(4児)しており、照射前から乏精子の傾向にあった($7\times 10^6/\text{cm}^3$) Hodgkin 病患者(H1)を除き、正常児の誕生をみている。

表3. 放射線照射後の受胎

No	年齢	精巣線量(rad)	推定受胎時	推定授精時	性
			精子数($\times 10^6/\text{cm}^3$)	(治療開始後(週))	
⑧	24	—	5. 0	8 2	男
⑫	35	7 7	0. 5~1. 0	1 0 0	男
H1 [†]	24	1 9	2. 0~2. 5	5 2	自然流産
LS	33	1 4 8	7~1 4	1 3 5	男
SS*	40	2 0 0	5~1 0	4 8	男
			50	1 0 0	女

†: マリファナ常習者、照射前から乏精子($7.0\times 10^6/\text{cm}^3$)、流産児は静脈瘤嚢腫

*: 表3にはない滑膜肉腫患者。精巣線量は推定。

表4. 放射線治療後の精子数の推移 (Schlappack '88²⁾)

No	年齢	正中線 量(Gy)	精巣線量 (Gy)	精子数($\times 10^6/\text{ml}$)			回復期間 (月)*
				治療前	最小	最大回復	
①	49	25.0	0.34	20.5	1.0	55.0	17
②	29	25.0	0.44	16.5	1.3	49.0	8
③	41	25.2	0.48	61.3	2.8	40.0	11
④	36	35.0	0.53	27.3	0.0	41.0	15
⑤	33	25.0	0.57	7.8	1.3	18.8	3
⑥	27	25.2	0.63	23.8	0.0	20.0	13
⑦	28	35.2	0.63	108.0	0.3	68.8	7
⑧	35	25.0	0.75	47.5	0.0	14.8	5
⑨	39	25.0	0.77	2.3	0.0	19.5	18
⑩	45	25.8	0.77	27.8	0.5	14.0	7
⑪	45	25.5	0.95	145.8	0.0	39.3	12
Mean \pm SE	36 \pm 2	27 \pm 1	0.62 \pm 0.05	44 \pm 14	0.7 \pm 0.3	35 \pm 6	11 \pm 2

* : 最少精子数から最大回復までの期間(月)

表5. 放射線治療後の精子数の推移 (Centola '94³⁾)

No	年齢	精巣 線量(cGy)	(範囲)	治療前	精子数($\times 10^6/\text{ml}$)				
					治療後(月)				
					3	6	12	18	30
①	34	—	—	46	—	—	47.5	—	—
②	24	65	—	57	7.6	—	8.9	9.6	62.7
③	28	28*	(24-32)	49	4.4	—	38	—	—
④	33	32.5	(26-39)	40	—	7.3	—	95	—
⑤	42	37	(32-42)	27	8.6	—	42	—	—
⑥	33	90	(82-98)	15,22	—	4.3	not return for sperm analysis		
⑦	42	49	(45-53)	189	58	32	325	—	—
⑧	29	39.5	(31-48)	40	—	7.1	not return for sperm analysis		

*: 著者らは、「これまで報告された最小のしきい値」としている。

[受胎状況]③治療終了後、9月及び35月、④治療終了後、12月、⑥治療終了後14月

⑧保存精液にて人工授精

2. 3 精子の性状の変遷

SC88及びCE94においては精子数の他に、精子の運動性、形態等についても報告しているので、それらを表6、表7.に示す。

表6. 照射前と最大回復時の射精量及び精子性状の比較(Schlappack '88²⁾)

	射精量(ml)	運動精子(%)	正常形態(%)	膨張精子(%)
照射前	4.7 \pm 0.5	20.3 \pm 5.2	13.4 \pm 5.4	39.6 \pm 7.4
回復時	3.9 \pm 0.4	42.5 \pm 6.0	23.4 \pm 5.1	58.7 \pm 6.8
前/回復	P=0.054	P=0.01	P=0.053	P=0.2

上記の如く、いずれも照射前と回復時で有意差を示しておらず、精子数の回復とともに、運動性、形態とも正常に復するといえよう。

なお、血中卵胞刺激ホルモン(FSH)が経時的に測定されており、精子の減少に伴う血中FSHの増加がみられているが、血中FSHの最大値と精子線量、照射後最大値に至るまでの期間と精子線量の間には相関はみられていない。

表7. 照射前後の精子性状の推移[mean±SEM](Centola '94³⁾)

	患者数	精子数 ($\times 10^6/\text{ml}$)	運動性 (%)	形態 (%)	HOS* (%)	Live [§] (%)
照射前	8	53.8 [17.5]	59.4 [3.8]	81.0 [5.1]	74.2 [3.2]	64.0 [3.6]
3月	4	19.7 [12.8]	15.5 [11.8]	78.7 [3.6]	73.7 [8.7]	—
6月	3	12.7 [6.5]	27.7 [11.0]	77.7 [3.2]	73.0 [17.2]	69 [3.0]
12月	6	92.3 [58.7]	60.2 [6.0]	83.8 [2.1]	80.0 [1.1]	74 [2.0]
18月	2	52.3 [43.1]	71.5 [9.6]	85.0 [3.0]	78.3 [5.1]	72 [2.6]
30月	1	62.7	56.0	86.0	70.0	—

* : hypoosmic swelling test, § : by vital dye excursion

症例④及び⑦(表5.参照)の、照射後6月における運動性及び正常形態精子比率が低いことを除けば、照射前後におけるこれらの性状は全て性状範囲にあった。

2. 4 精子数回復までの期間

HA82及びSC88において、精巣線量と治療開始から精子数回復までの期間が図示されているので、それを図1.図2.に示す。いずれも正の相関を示す。

なお、両報告において「回復」の定義が異なっているので注意を要する。

図1. Hahn '82、回復¹⁾：初回復確認までの期間

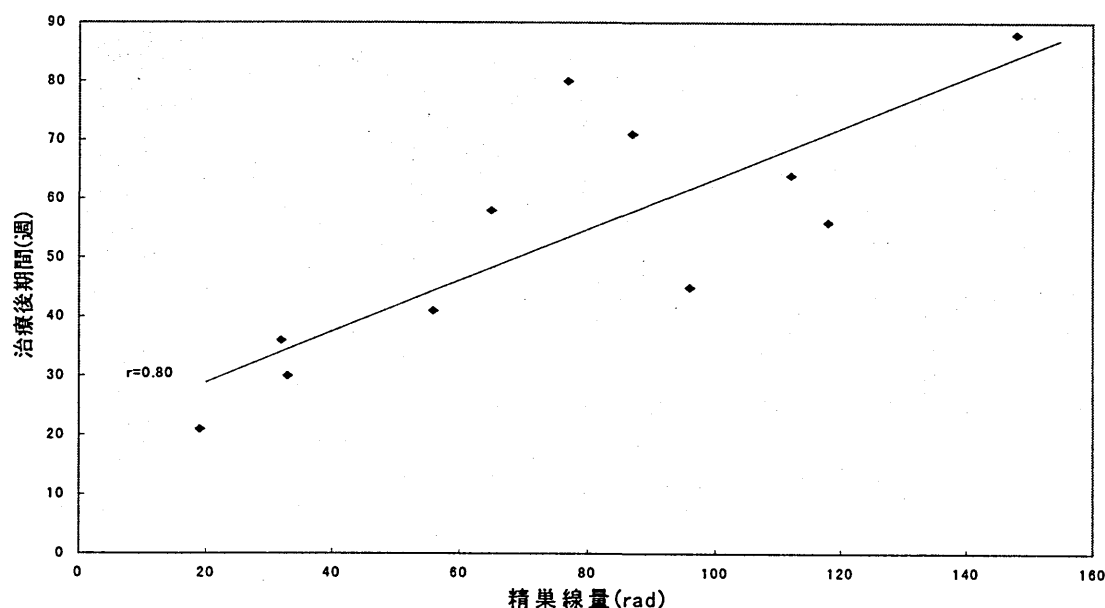
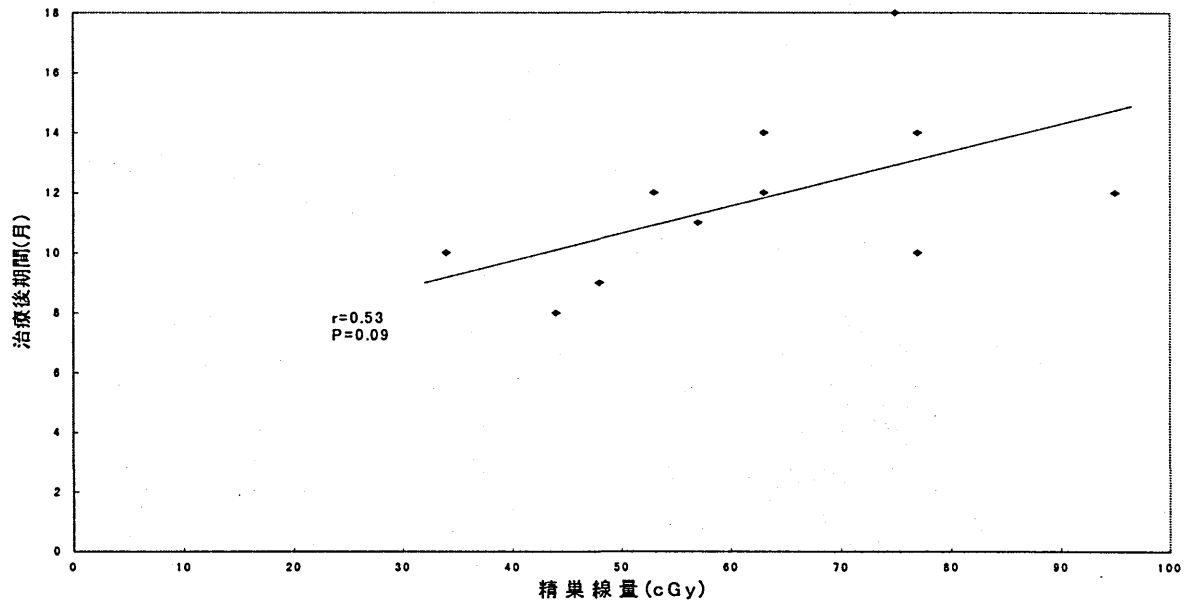


図2. Schlappack '84³⁾、回復：最少<1→≥2.25、最少>1→>6(各×10⁶)



2. 5 考察

3つの報告(計37症例)から、次のことが示されている。

- I ICRP41の示す一時的不妊の1回短時間被曝のしきい値150mSv、多分割/遷延被曝のしきい値400mSv/年の間の精巣線量で精子数の低下がみられた症例がある。
- II 多くの症例は精子数が照射前又は正常値($20 \times 10^6/\text{cm}^3$ 以上)に回復しており、回復が観察されなかった12症例は表8.のように分類される。

表8. 照射後精子数の回復が観察されなかった症例

症例	最大回復精子数 ($\times 10^6/\text{cm}^3$)	(1)照射前から乏精子* 照射前精子数($\times 10^6/\text{cm}^3$)	(2)精子追跡検査 から脱落	(3)精巣線量が高い 精巣線量(mGy)
HA ⑤	2.0			9 6 0
HA ⑩	0.1	1.0		
HA ⑪	0.5	0.1		
HA ⑫ [§]	10.0			7 7 0
HA ⑬	—		○	
HA ⑭	—		○	
HAHI [§]	2.5	7.0		
SC ⑤	18.8	7.8		
SC ⑧	14.8			7 5 0
SC ⑨	19.5	2.3		
SC ⑩	14.0			7 7 0
CE ⑥ [§]	—		○	
CE ⑧	—		○	

ここで3報告、Hahnら¹⁾、Schlppackら²⁾、Centolaら³⁾をそれぞれHA、SC、CEと略し、症例について表3、表5、表6の番号を付し、HA①のように示す。

§：照射後、自然授精(表4、表6参照) *：精巣腫瘍と乏精子との関連が示唆されている。

III 照射後 7 例(8 児)が自然受胎しており、異常の記載は照射前から乏精子のマリファナ常習症例の児が静脈瘤嚢腫で自然流産(HAH1)したもののみであった。

なお、1 例が照射前の保存精液による人工授精で受胎している。

IV 精子数が回復するまでの期間は精巣線量に比例して長くなり、回復開始まで 88 週を要した症例もある。

文 献

- 1) Hahn EW, Feingold SM, Simpson L, Batata M: Recovery from Aspermia Induced by Low-Dose Radiation in Seminoma Patients, Cancer 50(2)337-340, 1982
- 2) Schlappack OK, Kratzik C, Schmidt W, Spona J, Schster E: Responce of the Seminiferous Epithelium to Scattered Radiation in Seminoma Patients, Cancer 62(8)1487-1491, 1988
- 3) Centola GM, Keller JW, Henzler M, Rubin P: Effect of Low Dose Testicular Irradiation on Sperm Count and Fertility in Patients with Testicular Seminoma, J.Androl.15(6)608-613, 1994
- 4) Martin RH, Hilsebrand K, Yamamoto J et al: An Increased frequency of Human Sperm Chromosomal Abnormalities after Radiotherapy, Mutation Res.174(3)219-225, 1986

[補遺] 放射線照射後の精子染色体

Martin らはセミノーマ等により患側精巣摘除後、傍動脈及び患側骨盤照射(一部を除き、25分割/5～6週)を受けた患者の健側精巣線量を測定の上、36月間観察している。

造精能は健側精巣線量の大きい3名を除き回復している。

精子の染色体分析を行い、下表の結果を得、異常染色体出現率の経時的推移を示している。

精子染色体異常と染色体異常児の出生の関係については、接合能力を示す報告、羊水穿刺による欠損染色体胎児の報告等を引用し、リスクの増加を想定している。

Tab. 1. 精巣線量と異常染色体出現率

No	年齢	診断※1	総線量等 (Gy)※2	遮蔽※3	精巣線 量(Gy)	精子染色体分析(異常/検体)							
						前	1月	3月	12月	24月	36月	48月	60月
①	29	S	30	B	0.8						2/10	0/3	1/8
②	40	S	30	B	0.9						5/11	13/62	1/4
③	31	S	30	A	0.4			0/1	0/6	6/47	1/16	2/37	4/19
④	47	S	30	A	3.1	0/4							
⑤	20	L	61.6 +化学療法	C	0.5					0/2	2/13		1/1
⑥	19	T	40	C	1.6	0/1					1/4	0/5	
⑦	24	S	30	B	0.8					1/6	4/25	3/34	
⑧	29	S	30	B	1.0						2/3	0/11	
⑨	22	S	30	B	1.3	0/3							
⑩	39	R	45	C	5.0							0/4	
⑪	28	S	30 +25(胸椎)	A	0.6	0/1							
⑫	20	H	40	A	2.4		1/1						
⑬	41	M	41+33+20 (頭蓋) 36(全脊椎)	C	ND						1/4		

*1: S:セミノーマ、L:リンパ種、T:奇形腫、R:直腸がん、H:Hodgkin病、M:髄芽腫

*2: 特記するものを除き、傍動脈及び骨盤照射、化学療法なし。

*3: A:陰嚢遮蔽、B:陰嚢牽引、C:なし

Tab 2 経時的出現率

治療後(月)	前	1	3	12	24	36	48	60
異常(%)	0/9	1/1	0/1	0/6	7/55(13)	18/86(21)	18/156(12)	7/32(22)

Tab 3. 放射線治療後検出された異常染色体の核型^註

数的異常(18例)

過多(2例)

(24, X, +C)、(24, Y, +D)

過多+構造異常(2例)

(24, X, +21, csb15q)、(24, X, +D, +f)

二重異常

(23, XY, -18)

構造異常(8例)

過少(12例)

過少+構造異常(1例)

その他の同種の報告においては、放射線照射後の異常染色体の増加を見た、見ないとするいずれの報告もある。

Tab 4.がん治療後の精子染色体異常

報告者(年)	疾患(症例数)	治療 [§]	治療終了～ 検査の期間	染色体異常	
				数的異常	構造異常
Martin et al ('86, '89)	セミノーマ等(13)	RT(0.5～5Gy)	1月～5年	↑	↑
Jenderny et al ('87)	? (1)	RT(0.5～0.8Gy [†])	18～20月	→	→
Genesca et al ('90)	Wilms 腫瘍(2)	RT(22, 40Gy)/CT	11年、17年	→	↑
Brandriff et al ('94)	Hodgkin 病(6)	RT(0～4Gy)/CT	3～20年	↑	↑ [※]
Monteil et al ('97)	Hodgkin 病(1)	RT(0.5Gy)/CT	38日	↑	/

§ : RT-放射線照射(精巣線量)、CT-化学療法、※ : 統計的有意差なし。

- Martin RH et al: An increased frequency of human chromosomal abnormalities after radiotherapy, Mut.Res.174(3)219-225, 1986
- Martin RH et al: A comparison of chromosomal aberrations induced by in vivo radiotherapy in human sperm and lymphocytes, Mut.Res.226:21-30, 1989
- Jenderny J et al: Chromosome analysis of human sperm I.First results with a modified method, Hum.Genet.76:385-388, 1987
- † Jendery J et al: Remarks to the letter from R.H.Martinm Hum.Genet.79: 393, 1988
- Genesca A et al: Human sperm chromosomes, Long-term effect of cancer treatment, Cancer Genet.Cytogenet.46:251-260, 1990
- Brandriff BF et al: Chromosomal damage in sperm of patients surviving Hodgkin's disease following MOPP (nitrogen mustard, vincristine, procabazine, and prednisone) therapy with and without radiotherapy, Hum.Genet.93:295-299, 1994
- Monteil M et al: Increased aneuploid frequency in spermatozoa from a Hodgkin's disease patient after chemotherapy and radiotyherapy, Cytogenet. Cell Biol. 76(3-4)134-138,1997

註 核型の記載方法

- () 内に、総染色体数、性染色体、異常 の順に記載する。例えば、(24,X,+C)とは、総染色体数 24 本、X 染色体を有し、C 群染色体が過多のものを指す。
- 異常の表示記号
 - + : 過多、- : 過小、C : C 群(第 6～12 染色体)、D : D 群(第 13～15 染色体)、
 - f : fragment、cbs : chromosome breaks

広島・長崎の原爆被爆者二世においては、染色体異常の出現率は増加していないと報告されている。

Tab 5. 原爆被爆生存者の子※における染色体異常の頻度(1,000 対)

	性染色体	転座		トリソミー	計	受検者数
		均衡	不均衡			
対照‡	24(3.01)	25(3.13)	2(0.25)	0	51(6.39)	7,976
被ばく:父	7(2.87)	8(3.28)	3(1.23)	1(0.41)	19(7.79)	2,440
母	9(1.85)	7(1.44)	2(0.41)	0	18(3.69)	4,873
父母	3(2.97)	3(2.97)	0	0	6(5.95)	1,009
計	19(2.28)	18(2.16)	5(0.60)	1(0.12)	43(5.17)	8,322
新生児¶	127(2.23)	110(1.93)	34(0.60)	84(1.44)	353(6.2)	56,952

※：爆心地から 2,000m 以内で、>1rad(T65DR)被曝した親から'46.5.1~'58.12.31 に出生した児。検査時年齢 - 12~38 歳

‡：爆心地から 2,500m 以上又は市外に居た親から出生した児

¶：Hook & Hamerton (1977)

・ Awa AA et al: Cytogenic Study of the Offspring of Atomic Bomb Survivors, Hiroshima and Nagasaki, In Obe G & Basler A(ed.): Cytogenetics, Springer-Verlag 1987, 166-183

低線量による造血機能抑制

1. 調査事項

低線量における造血機能抑制に関する知見について調査した。

2. 調査方法

ICRP41 は 1984 年に刊行され、その最も新しい引用文献の刊行年は 1982 年であることから、その後の知見について、主として米国国立医学図書館の MEDLINE による系統的な文献検索を行い、その抄録から有用と考えられるものについて、可能な範囲で原本を入手した。

3. 調査結果

検索された文献の多くは、悪性腫瘍の放射線治療に伴う影響に関するもので、骨髄線量又は全身線量が数百 mSv レベルの症例を含むものとしては、下記の 4 件(I～IV)が検索された。いずれも抗腫瘍関連抗原抗体等にラベルした放射性同位元素(RI)の投与により可及的に腫瘍部位に選択的な照射を図る治療に係るものである。

I 及び II は、肝転移のある結腸/直腸がん患者に対する RI でラベルした抗腫瘍胎児性抗原抗体(抗 CEA 抗体)による治療に係るものである。

I においては骨髄線量 1000mGy 程度まで骨髄抑制なしと記載されており、白血球/血小板数の記載はないが、骨髄抑制が見られた 2 症例(骨髄線量：約 4 Gy、約 2 Gy)においても臨床症状を伴うほどの数値は示されていないことから、正常値に近い値が保たれているものと考えられる。

なお、両症例は治療後 4～5 週に血球数が極小値に至り、その後自然に回復している。

II は 3 例のみの報告であるが、骨髄線量と血小板数の関係は、670mSv 及び 426mSv で軽度減少、377mSv で減少せずと記載されているが、426mSv の例においてはその経過が早いこと(治療後 1 週で血小板数極小値)、及び動物実験による知見から、肝照射に伴うものと推測されている。

なお、血小板減少が見られた両症例とも回復が確認されている。

Ⅲは神経芽細胞腫患児に対する RI(^{131}I) でラベルした metaiodobenzyl-guanidine(MIBG)^註 による治療に係るものである。腫瘍への取り込みの推測の精度に問題があるとして、全身及び血液の吸収線量のみが算定されている。

全身線量は高く 1000mGy を超えるものがほとんどであるが、あえて試みれば、500mSv 程度では血小板減少は生じないとの外挿がなされる。

ⅣはB細胞リンパ腫に対する、RI(^{131}I) でラベルした抗 CD37 抗体による治療に係るものである。全身吸収線量のみが算定されており、全身線量 400mGy 程度でも白血球/血小板の減少が見られている。しかし、抗 CD37 抗体はリンパ系、骨髄に集積するので、骨髄線量は全身線量より高いものと考えられる。

4. まとめ

R I 治療を受けた悪性腫瘍患者において骨髄線量 500mSv 程度によっては白血球、血小板の有意な減少は見られていない。

なお、R I 治療による知見から宇宙放射線被ばくによる影響を推測するには次のような難点があることに留意する必要がある。

- (7)悪性腫瘍そのものによる影響
- (1)併用する化学療法等による影響
- (7)RI 投与量から吸収線量への換算の精度

^註 guanethidine(アドレナリン受容体ブロッカー)類似物質。norepinephrine 様に体内分布する。(ICRP 53 : 329~331)

I. Mittal et al: Phase I/II Trial of Combined ^{131}I Anti-CEA Monoclonal Antibody and

Hyperthermia in Patients with Advanced Colorectal Adenocarcinoma, Cancer 78 : 1861-1870, 1996
【ノースウェスタン大学, Chicago, IL】

- ・対象患者：肝転移のある結腸/直腸がん、9例(少量投与により腫瘍集積性の認められた6例に治療)、治療前 白血球 $\geq 3,500/\text{mm}^3$, 血小板 $\geq 10^5/\text{mm}^3$
- ・治験薬： ^{131}I ラベル抗腫瘍胎児性抗原モノクロナル抗体
- ・投与量→骨髄線量換算：クリアランス法
- ・併用療法：高体温($40\sim 42.4^\circ\text{C}$)

No	年齢/性	^{131}I 投与量 (治療)	骨髄線量(mGy)			血球減少(前→極小)	
			診断	治療	計	白血球($10^3/\text{mm}^3$)	血小板($10^3/\text{mm}^3$)
①	65/女	53mCi	198	1964	2164	骨髄抑制(一)	
③	73/男	58	190	2215	2405	骨髄抑制(一)	
④	62/女	52	107	809	916	骨髄抑制(一)	
⑤	40/女	106	206	3825	4031	7.1→2.1	283→39 (註)
⑥	67/男	97	43	769	812	骨髄抑制(一)	
⑨	48/女	90	70	1866	1936	5.3→2.1	258→58 (註)

(註)：いずれも治療後4～5週に極小となり、その後自然に回復した。

II. Wong YC et al: Initial Experience Evaluating ^{90}Y trium-Radiolabelled Anti-Caricinoembryonic Antigen Chimeric bT84.66 in a Phase I Radioimmunotherapy Trial, Cancer Res. 55(23S)5929S-5934S, 1995

【City of Hope National Medical Center, CA】

- ・対象患者：肝転移のある結腸/直腸がん、3例
- ・治験薬： ^{90}Y ラベル抗腫瘍胎児性抗原抗体
- ・投与量→骨髄線量換算 medical internal radiation dose method (MIRD0SE2 program)

No	年齢/性	転移	以前の化学療法	^{90}Y 投与量 (mCi)	骨髄線量 (mSv)	血小板減少
①	47/女	腹壁 腹膜 骨盤	5FU leucovorin IUdR	7.5	670	grade 1 4週で極期 8週で回復
②	57/女	肝臓	5FU leucovorin hydroxiurea	9.5	377	なし
③	55/男	肝臓	cis-Pt, FUdR leucovorin CPT-11	9.9	426	grade 1 1週で極期、6週で回復 肝臓照射による捕捉?

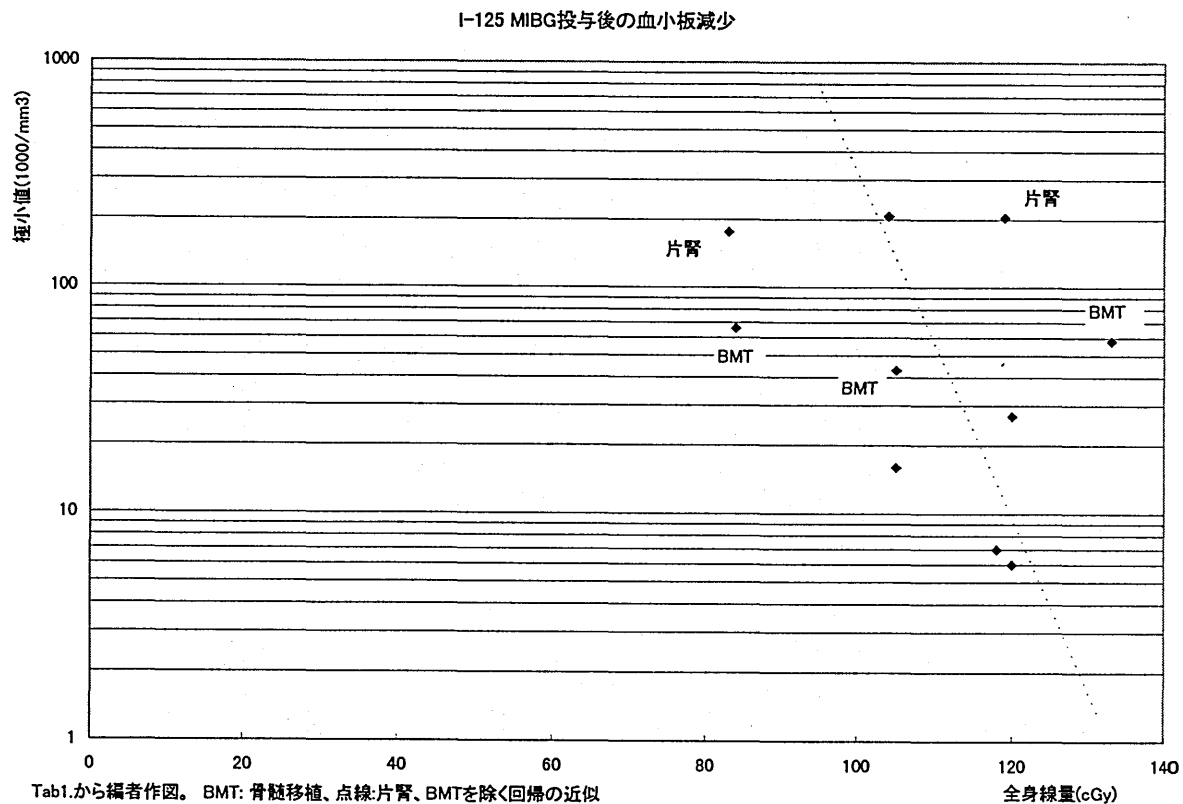
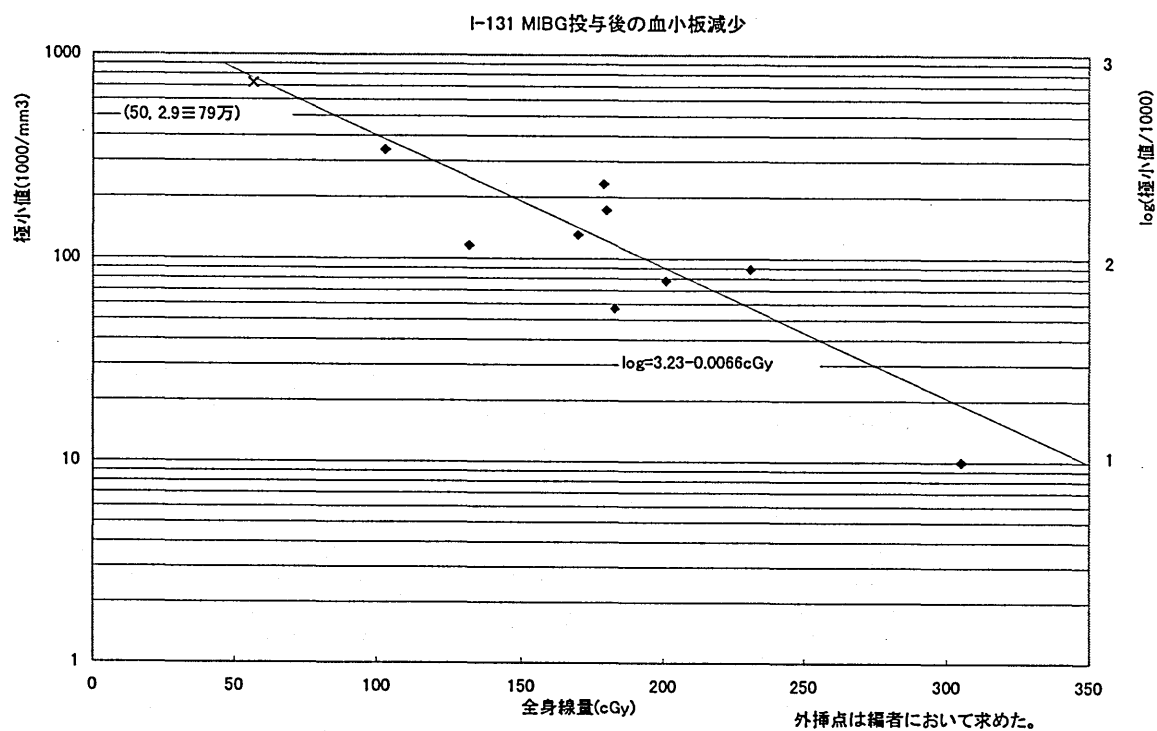
Ⅲ. Sisson JC et al: Predictors of Toxicity in Treating Patients with Neuroblastoma by Radiolabelled Metaiodobenzylguanidine, Europ.J.Nucl.Med.21(1)46-52, 1994

【ミシガン大学】

- ・神経芽細胞腫患者 9 + 10 人、(骨髓生検にて浸潤<25%)
- ・治療薬：¹³¹I ラベル metaiodobenzylguanidine(MIBG)
- ・投与量→線量換算 MIRD formalism

A. ¹³¹ I ラベル MIBG ¹³¹ I 半減期：8.02 日						
No.	投与量(GBq/m ²)	吸収線量(cGy)		血小板		備考
		全身	血液	極小値(10 ³ /mm ³)	極小/前	
①	8.66	231	110	89	0.30	
②	19.8	183	88	57	0.26	
③	8.95	180	76	173	0.45	
④	9.58	170	84	131	0.45	
⑤	9.51	132	—	116	0.29	
⑥	5.07	103	59	342	0.97	
⑦	8.33	179	—	233	0.73	
⑧	9.25	201	—	78	0.27	
⑨	9.92	305	—	10	0.11	
B. ¹²⁵ I ラベル MIBG ¹²⁵ I 半減期：59.41 日						
(1)	20.0	105	69	16	0.11	
(2)	16.1	83	55	176	0.49	片腎
(3)	23.5	104	73	207	0.50	
(4)	23.0	133	89	58	0.25	骨髓移植
(5)	31.5	118	82	7	0.017	
(6)	19.9	105	69	43	0.23	骨髓移植
(7)	21.8	84	61	66	0.35	骨髓移植
(8)	23.3	120	—	27	0.17	
(9)	12.0	119	80	204	0.47	片腎
(10)	29.5	120	66	6	0.022	

(編注)性/年齢の記載なし。体重,体表面積からほとんどが乳幼児と考えられる。



IV. Kaminski MS et al: Imaging, Dosimetry, and Radioimmunotherapy with Iodine 131-Labelled Anti-CD37 Antibody in B-Cell Lymphoma, J Clin Oncol 10(11):1696-1711, 1992
【ミシガン大学】

- ・対象患者：B細胞リンパ腫、12例(骨髓生検にて浸潤<25%、抗マウス抗体(-))、1例(①)は腫瘍集積性(-)のため除外。
- ・治療薬：¹³¹I ラベル抗 CD37 モノクローナル抗体
- ・投与量→骨髓線量換算：tracer studies

No.	年齢/性	病巣数/リンパ系外病巣(数/部位)	投与量 (mCi)	換算係数(全身) (cGy/mCi)	全身線量 (cGy)	Toxicity [※] 白血球減少 血小板減少
②	57/男	9/3(肝,両肺)	25	0.35	9	NA [‡]
③	45/男	8/-	67	0.29	19	No toxicity
④	40/男	6/-	96	0.29	28	No toxicity [§]
⑤	40/男	10/1(肺)	133	0.32	50	grade 3 grade 3
⑥	46/男	5/-	149	0.34	51	grade 3 grade 3
⑦	42/男	12/4(皮,骨,両肺)	150	0.26	39	grade 2 no toxicity
⑧	46/女	3/1(筋)	120	0.34	40	grade 3 grade 4
⑨	55/男	5/2(筋,皮)	76	0.51	39	No toxicity
⑩	64/男	5/1(皮)	161	0.25	40	grade 3 [†] grade 1
⑪	67/女	1/1(筋)	81	0.51	40	grade 1 grade 2
⑫	49 男	1/-	-	0.28	-	

※：National Cancer Institute Common Toxicity Criteria

‡：19日目に死亡、判定不能 §：次の治療までの37日間観察 †：好中球のみ

編注] 血球減少のクライテリア

・ ECOG [※] (Eastern Cooperative Oncology Group)			・ National Cancer Institute Common Toxicity Criteria [§]		
	白血球	血小板		白血球	血小板
Grade 0	≥4500	≥130000		≥4000	WNL
Grade 1	4500>, ≥3000	130000>, ≥90000		3900~3000	WNL~75000
Grade 2	3000>, ≥2000	90000>, ≥50000		2900~2000	74900~50000
Grade 3	2000>, ≥1000	50000>, ≥25000		1900~1000	49900~25000
Grade 4	1000>	25000>		1000>	25000>

※: <http://ctep.info.nih.gov/CTC3/default.htm>, §: <http://ecog.dfci.harvard.edu/>

IIにおいて、血球減少を「grade」で表示しているが、用いている基準の記載はない。

【別添 3】

宇宙飛行に伴う免疫低下

1. 調査事項

宇宙飛行における免疫低下に関する総説¹を紹介する。

なお、Noは原総説の引用番号である。

◎ 想定される機序別、免疫低下

○ 無重量

No	報告者/年	方法/結果	考按
10	Golgi et al/79	simulation/リンパ球反応性	機序 [直接]細胞内器官分布の変化 [間接]細胞分布の変化 むしろ、ストレスによる？
23	Gmunder et al/90	細胞内情報伝達関連経路の変化 ・ protein kinase C ・ phosphatidylinositol リンパ球 mitogen 反応性 ↓	細胞の形態変化(1G で扁平なリンパ球が、無重量では球形)が関与？ 機序：基質への接触不足
8	Golgi et al/93	in vitro in space/ リンパ球反応性低下	
42	Meehan et al/87	宇宙飛行士帰還後の検査/ リンパ球反応性低下と飛行期間の相関認めず 帰還後2週間で回復	機序：無重量よりもストレスの影響？

○ 放射線 惑星間ミッション等、長期では重要

○ ストレス

No	報告者/年	方法/結果	考按
44	Meehan et al/93	宇宙飛行士帰還後の検査等/ 好中球 ↑, リンパ球 ↓, 好酸球 ↓ CD4+細胞 ↓	機序： ストレス → カテコラミン放出 → CD4+細胞 ↓ ↳ ACTH 放出 → 分画変化
60	Taylor et al/83		
22	Gmunder et al/96	Skylab, シャトルミッション ・ 血清・尿コルチゾール ↑ ・ 血液・尿カテコラミン 通常は ↓	

¹ Levine DS et al: Immunosuppression during spaceflight deconditioning, Aviat. Space Environ. Med 69(2)172-177, 1998

○ 類似の身体ストレス

No	報告者/年	方法/結果	考按
17	Dorian et al/88	運動選手の免疫能/ ・ T 細胞 mitogen 反応性 ・ CD4+/CD8+ ↓ ・ natural killer T 細胞活動 ↓ ・ 金メダリスト(Coe)の易感染性	血清コルティゾールレベル↑と相関
62	Weidner et al/94	運動選手に呼吸器感染症多い	
28	Hawkins et al/75	Apoli 宇宙飛行士/ 帰還後の呼吸器感染症	

○ 類似の心理的ストレス

No	報告者/年	方法/結果	考按
32	Kasl et al/79	陸軍士官学校生徒/ 心理的ストレス・レベルと Epstein-Barr ウイルス感染との相関	
20	Glasser et al/85	医学生/ストレス、孤独とヘルペスウイルス抗体価の相関	
40	Luborsky et al/76	看護学生/不安感と単純ヘルペス再発の相関	
16	Dorian et al/85	会計士の業務上ストレス ・ リンパ球インターロイキン産生 ↓ ・ T 細胞 mitogen 反応性 ↓ ・ natural killer T 細胞活動 ↓	

○ その他

No	報告者/年	方法/結果	考按
26	Greenleaf et al/94	ベッド・レスト、宇宙飛行/ 脱水が免疫能低下を促進	
27	Greenleaf et al/95	細胞内情報伝達関連経路の変化 ・ protein kinase C ・ phosphatidylinositol	血清浸透圧が関与?
53	Schmitt et al/96	ベッド・レスト/ インターロイキン 2 分泌 ↓	

◎ 宇宙飛行士の免疫能低下の影響

No	報告者/年	方法/結果	考按
35	Konstantinova et al/79	飛行前リウマチ因子(+)の宇宙飛行士の力価が 8 日飛行後上昇	

有人サポート委員会 宇宙放射線被曝管理分科会 中間報告

平成 11 年 3 月発行

発行：宇宙開発事業団

〒105-8060

東京都港区浜松町 2 丁目 4 番 1 号

世界貿易センタービル

TEL：03-3438-6000（代表）

＜本資料に関するお問い合わせ先＞

宇宙開発事業団 宇宙環境利用システム本部

宇宙環境利用推進部内 有人サポート委員会事務局

TEL：0298-54-3952 FAX：0298-50-2232