

航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する
検討について

平成 17 年 11 月 29 日

文部科学省 科学技術・学術政策局
放射線安全規制検討会

はじめに

従来から、自然界には、我々人類が不可避免的に年間平均 2.4mSv 程度被ばくする自然放射線が存在することが知られており、宇宙線もその一つである。宇宙線の正体は、太陽を含む恒星や超新星爆発などによって発せられる高速の荷電粒子の流れと言われているが、地球に到達する宇宙線の多くは、地球の磁場によって曲げられ、大気によって減衰するため、地表における宇宙線被ばく線量は、年間 0.4mSv 程度と言われている。しかしながら、この地磁気や大気による減衰効果が弱い高緯度、高高度を飛行する航空機においては、宇宙線による被ばく線量が地表に比べて増大することが知られている。

このため、ICRP1990 年勧告において、航空機乗務員の被ばくも他の 3 つの自然界の放射線源による被ばくと同様に職業被ばくとして扱う必要がある旨勧告され、1996 年の放射線防護指令において EU 加盟国に対し、対策の実施が求められた。我が国では、平成 10 年 6 月の放射線審議会において、宇宙線の被ばく線量の測定方法や線量評価等について調査・検討を行い、国際的動向も考慮しつつ対応するよう意見具申がなされ、その後、関係団体などからも具体的な検討の実施が求められてきた。

このような状況を受け、文部科学省は、航空機乗務における宇宙線被ばくについて、これまでの研究成果や国際的な動向等を踏まえつつ、その実態を明らかにするとともに、基本的な考え方を取りまとめることを目的に、科学技術・学術政策局の放射線安全規制検討会の下に、平成 16 年 6 月以来、「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ」を開催し、検討を行ってきた。

本ワーキンググループのメンバーには、放射線防護、宇宙線研究、放射線測定、航空医学、産業保健、放射線医学、自然放射線研究など様々な分野の専門家が参加した。また、検討に当たっては、ワーキンググループメンバーの知見だけではなく、宇宙航空研究開発機構や日本保健物理学会、ICRP 委員、外国企業など、必要に応じて外部専門家による説明をお願いし、更に、実際の現場の状況について定期航空協会及び日本乗員組合連絡会議（日乗連）からの意見聴取も含め、また国土交通省や厚生労働省の協力も得て議論を深めてきたところである。

検討の途中、フランス及び米国の両科学アカデミーから、宇宙線などの低線量放射線の健康影響について、全く異なる趣旨の論文が発行されたが、これら最新の知見も検討の過程で参考とした。

この報告書は、本ワーキンググループの計 11 回にわたる検討の成果を取りまとめ、航空機乗務員の宇宙線被ばく管理についてのガイドラインを示したものである。

目 次

| | |
|---------------------------|-----|
| ．これまでの航空機乗務員の宇宙線被ばくに関する知見 | 1 |
| ．航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の評価等について | 7 |
| ．一般的な放射線防護の考え方について | 1 1 |
| ．航空機乗務員における宇宙線被ばくの管理について | 1 5 |

付録 1 航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキング
グループ資料集

付録 2 ICRP Pub.82 及び UNSCEAR2000 年報告書（抜粋）

付録 3 自然放射性物質の規制免除について（抜粋）

付録 4 1996 年 EU 指令（96/29EURATOM）（抜粋）

付録 5 EURADOS 報告書「Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew」（抜粋）

付録 6 用語解説

参考資料 ワーキンググループ委員名簿

．これまでの航空機乗務員の宇宙線被ばくに関する知見

1．宇宙線のメカニズム

ア．宇宙線の発生の源及びその成分

宇宙線とは、太陽系外における超新星爆発や太陽活動の際に放出される高エネルギー粒子（陽子、アルファ粒子、重粒子等）の流れを指すものであり、宇宙空間を常に飛び交っていることが知られている。【付録1：資料第1 - 2号参照】

これらの高エネルギー粒子（1次宇宙線）のほとんどは荷電粒子であり、数百 MeV 未満のエネルギーでは、地球磁場が持つ Cut-off 効果により地球外に弾かれる。さらに、大気圏（高度約 100km 以下）に突入した粒子は、大気を構成する原子（窒素、酸素、アルゴン）の原子核とカスケード反応を起こし、陽子、中性子、電子、ミュオン（2次宇宙線）を生成して、エネルギーを失いながら地表に到達する。このため、航空機の一般的な飛行高度（12,000m）における宇宙線被ばくは、2次宇宙線によるものを対象とすればよいとされている。

なお、地表における年間宇宙線量の世界平均は 0.4mSv（国連科学委員会 2000 年報告書）であるが、航空機の長距離飛行で一般的な飛行高度においては、それよりも多くの年間宇宙線量となることが知られている。【付録2参照】

イ．太陽活動に伴う地球での宇宙線の線量変化

太陽活動として、フレア（太陽表面の爆発現象）、コロナ質量放出、フィラメント消失、コロナホールなどが挙げられるが、宇宙線被ばくの観点からはフレアが重要である。その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を太陽粒子現象といい、特に、フレアに伴い放出される粒子を太陽フレア粒子と呼ぶ。

太陽活動には 11 年の周期があり、太陽粒子現象は例えば米国海洋大気庁（NOAA：National Oceanic and Atmospheric Administration）では、その規模により 5 段階に分類されている。最も小規模の太陽粒子現象は 11 年に 50 回程度の頻度で発生し、それを超える規模の太陽粒子現象の発生頻度はそれぞれ 11 年に 25 回、10 回、3 回、1 回以下と規模が大きくなるにしたがって低下する。大規模の太陽粒子現象の場合、放出される粒子数はフレアやコロナ質量放出発生後 1 - 数時間後に上昇し、その後一定レベルを保ち、緩やかに減少する。さらに、その 1 - 2 日後に放出される粒子数は、増大してピークを見せることも多い。【付録1：資料第7 - 3号及び第7回参考資料参照】

太陽活動が活発な時期は、大量に放出される太陽風により地球の磁束密度が高くなり、地上で観測される宇宙線は逆に減少して観測される（フォーブッシュ減少）。他方、太陽フレアに伴う高エネルギー粒子は地球磁場の抵抗に逆らって地球に近づくことができるため、線量が増大することもある。また、上述のとおり、エネルギーが数百 MeV に満たない太陽粒子は地球磁場に弾かれてしまい、航空機の飛行高度での被ばくに寄与しないが、それ以上のエネルギーをもつ太陽粒子が放出された場合は、航空機の飛行高度まで影響を及ぼす可能性がある。【付録1：資料第7 - 4号参照】

なお、日本 - 欧米間の路線で高緯度地域を飛行中に、観測史上最大の太陽フレア（11

年に1回以下の発生頻度)に遭遇すると仮定した場合は、当該の飛行1回に被ばくする線量は数 mSv 程度(最大でも 5 mSv 以下)であると推定される。

ウ．運航路線による被ばく線量の変化

運航路線により被ばく線量に影響を与える要因として、高度、緯度、飛行時間の3つがあげられる。

1) 高度による変化

大気に入射した宇宙線は、大気と相互作用を繰り返すことによりエネルギーを失いながら進むため、より低い高度での被ばく線量が減少する。ICRP Publication 75(1997年)によれば、宇宙線の線量率は、高度 12,000m では約 $5 \mu\text{Sv}/\text{時}$ 、高度 8,000m では約 $3 \mu\text{Sv}/\text{時}$ とされている。【付録1：資料第1 - 1号参照】

2) 緯度による変化

太陽活動が低下すると、地球を取り巻く磁束密度が弱まるため、大気に入射する宇宙線量は増加する。1965年に起こった太陽活動極小期における高度 12,000m での宇宙線量は、赤道付近で $4 \mu\text{Sv}/\text{時}$ 、地磁気緯度の高い地域で $12 \mu\text{Sv}/\text{時}$ と算定されており、磁力線に沿って宇宙線が入りやすい北極・南極に近い地域(地磁気緯度の高い地域)では、赤道付近よりも被ばく線量が約3倍高くなることわかる。【付録1：資料第4 - 6号参照】

3) 飛行時間による変化

飛行時間が長ければ、当然ながら被ばく線量は増加する。

ICRP Publication 75によれば、ジェット機に年間 200 時間乗務した場合の被ばく線量は、約 1 mSv とされている。この値は、高度 12,000m での線量率である約 $5 \mu\text{Sv}/\text{時}$ に 200 時間の乗務時間を乗じた値である。したがって、1000 時間乗務した場合は、同様の計算により、約 5 mSv の被ばく線量が算出される。

なお、北極地区通過路線(以下、「ポーラールート」という。)は、高度、緯度が高く、飛行時間も長いので、他の路線と比較して、航空機乗務員の被ばく線量大きい。

エ．我が国の NORM による被ばく線量

放射線審議会基本部会報告書「自然放射性物質の規制免除について(2003年)以下、「NORM 報告書」という。)による調査報告によれば、自然起源の放射性物質(NORM)およびそのうちの技術的に高められた自然起源の放射性物質(TENORM)による被ばく線量は以下の通りである。

産業利用されている鉱石類を扱う作業者のうち、比較的天然放射性物質の含有率が高い鉱石を扱う作業者の平均被ばく線量は、モナザイトで $0.3\text{mSv}/\text{年}$ 、リン鉱石で $0.28\text{mSv}/\text{年}$ 、チタン鉱石で $0.27\text{mSv}/\text{年}$ となっている。

一方、天然放射性物質を含有する鉱物が、化学的又は物理的に処理されて、一般消費

財として生活環境で数多く使用されているが、一般消費財による使用者の被ばく線量は、ラドン温泉浴素で 110 μ Sv/年、肌着で 220 μ Sv/年、布団で 90 μ Sv/年、壁紙で 10 μ Sv/年となっている。

いずれの場合も、それら自然放射線源による外部被ばく線量が公衆の線量限度である 1 mSv/年を超える、又は、それに近い線量になることはないと考えられている。

2. 放射線被ばくによる健康影響

ア. 放射線のヒトへの影響

放射線によるヒトへの健康影響については、ある一定レベル以上の放射線に曝露された場合に比較的短時間で発症する「確定的影響」と、線量に応じて長期の潜伏期を経て確率的に発生する「確率的影響」の二つが知られている。

1) 確定的影響

確定的影響には「しきい線量」があり、放射線を被ばくしても、一定のしきい線量を超えなければ健康影響は現れない。そして、しきい線量を超えると発症し、その症状は、線量が増加するに従い重篤度が増大する。

確定的影響の発症機構は組織幹細胞の死である。組織幹細胞が死ぬとその組織の機能細胞の補充ができなくなるので、機能細胞数が一定以下に低下すると組織機能が維持できなくなり、確定的影響が現れる。特定組織でこのようなことが起こるためには、相当数の幹細胞の死が必要であるので、一定以上のしきい線量を超えなければ確定的影響は起こらない。皮膚を例にとると、被ばくにより毛母細胞や基底細胞が脱落し、これが脱毛や潰瘍をもたらす。また消化管系でみると、小腸の陰窩における幹細胞の死により粘膜上皮細胞の補充ができなくなり、その一方で、古くなった粘膜上皮細胞は一定の速度で脱落し続けるため、ついには消化管出血を来し、甚だしい場合にはヒトの死に至る。

なお、確定的影響のうち、全身被ばくに関するしきい線量として、以下の数値が知られている。【付録 1：資料第 2 - 3 号参照】

| しきい線量 | 症 状 |
|------------|--------------|
| 200mSv 以下 | 臨床症状は確認されない |
| 500mSv | 末梢血中のリンパ球の減少 |
| 1000mSv | 悪心、嘔吐（10%の人） |
| 7000mSv 以上 | 100%死亡 |

(出典：ICRP Publication 60 他)

2) 確率的影響

確率的影響の発症機構は、放射線による突然変異誘発である。確率的影響には、生殖細胞突然変異による遺伝的影響と、体細胞突然変異による発がんがある。放射線による

突然変異誘発は、被ばく線量に応じて確率的に起こると考えられているため、低線量被ばくであっても線量に見合ったがんや遺伝的影響などの発生のリスクが増加するものと考えられている。しかしながら、近年の研究では、突然変異誘発についても極低線量と高線量とでは誘発の機構などが異なる可能性が明らかになりつつある。また、ヒトにおける放射線発がんや遺伝的影響に関する疫学データについても、低線量では不確実性が大きい。そのため、確率的影響については、低線量域でのリスクが未だに明確ではない。特に 100mSv 以下の低線量域については、実際のデータが欠落していることから、そのリスクは推定の域を出ず、各国アカデミー報告書の結論の違いなども含め、専門家の間でも未だ意見の一致を見ていない。例えば、疫学研究において適切な有意差をもって証明するためには、検出しようとする差が微小になるほど必要なサンプル数が膨大とならざるを得ない。加えて、ヒト集団は喫煙を含む生活習慣や遺伝的背景などが不均一であることから、元々のリスクの幅が大きく、低線量放射線のもたらす小さなリスクを明らかにすることは、現実的に無理がある。このようにヒト集団で低線量放射線の確率的影響の実際を疫学的に明らかにすることは不可能であるため、発症機構研究によりリスクを明らかにする試みがなされている。そして、アポトーシス、ゲノム不安定性、バースタンダー効果など、近年の放射線細胞生物学における細胞レベルでの発症機構研究が盛んに行われているが、現状ではまだ結論を出すには至っていないので、今後の成果が期待される。【付録 1：資料第 9 - 2号参照】

なお、1950 年から実施されている広島・長崎原爆被爆者 12 万人の疫学調査データでは、100mSv 以下の低線量域において長期的な健康影響の発生の有意差は認められていないことから、現在のわが国の放射線防護専門家の間では、100mSv 以下の低線量域の健康影響については、科学的には明らかではないとする一方で、現実的な放射線リスク管理の必要性から、しきい線量が存在しないものと仮定して（直線仮説または LNT 仮説: Linear Non-threshold）高線量域で得られた確率係数から低線量域に直線的に外挿し、管理すべき線量の目標値を安全側に設定する手法が一般的に用いられている。【付録 1：資料第 7 - 5号参照】LNT 仮説は、このようにあくまで防護のために設けられた一つの基準であり、これに基づいた確率係数を低線量放射線に被ばくした集団に適用して将来の発がん人数などを推計することは、本来の意味から正しい使い方ではない。

3) 放射線影響のリスクマネジメント

放射線誘発がんの発症には数年以上、時には数十年の潜伏期を要する複雑な生物過程を経て生じる。一方、発がんの原因となる突然変異は、放射線照射から数時間・数日の単位で起こってしまう。このため両者を直接つなぐことは困難であり、放射線発がんの発症機構はその意味で解明されているとは言えない。特に、低線量の生物作用については、適応応答、アポトーシス、遺伝的不安定性、バースタンダー効果など、現在次々に新しい知見が得られている状況である。そのため、発症機構研究においては、低線量放射線の影響として、高線量被ばくで発がんするのだから低線量でも影響がある、アポトーシスがあることから低線量の放射線は影響がない、適応応答があることから高線量被ばくに対する抵抗力をつける、ゲノム不安定性やバースタンダー効果があることから低線量でのリスクは LNT 仮説で求められるよりも桁違いに高くなる、など様々

な考え方がある。【付録 1：資料第 9 - 2 号参照】このため、100mSv 以下の低線量域での放射線防護については、具体的に存在する特定の確率的影響を念頭において対策を行っているのではなく、上記の可能性も考え、とりあえずできるだけリスクを低くするという観点からリスクマネジメントを行っているものである。さらに、上記の可能性については実際リスクが疫学的にも実験的にも検出されていないことから、国際放射線防護委員会などはこれを取り入れていない。

大規模な原子力発電施設等の放射線業務従事者に対する疫学調査（10 万人規模）からは、累積線量 100 mSv 程度の被ばくにより、白血病のリスク上昇がみられたものの固形腫瘍ではリスクは検出できなかったとの報告がなされている。その一方で、2005 年に発表されたさらに大きな疫学調査（40 万人規模）からは、低線量放射線の影響が白血病では見られなかったが固形腫瘍ではみられたとの報告がなされた。同じ調査からこのように相反する結論が出ることは、低線量放射線の疫学調査が非常に困難であることを示している。ちなみに、モナザイト産地など高自然放射線地域（数 mSv / 年程度）住民の疫学調査では、累積で 100mSv 程度の被ばく線量の差によっては、特にがん罹患率などに有意な差は見られていない。低線量放射線では、健康影響に対する寄与がより大きな喫煙や生活習慣などの交絡因子の影響が前面に出てしまう。そのため、放射線業務従事者に対する線量限度（50mSv / 年）程度以下の放射線被ばく線量では、それら交絡因子の影響を受けない放射線のみによる有害な健康影響を疫学的手法で検出することは不可能に近い。【付録 1：資料第 7 - 5 号参照】

3. 我が国の航空機乗務員の勤務実態

ア. 航空機乗務員の構成

航空機乗務員は、運航乗務員と客室乗務員に分けられる。客室乗務員数は運航乗務員数に比べて 2.5 - 3 倍多く、客室乗務員においては女性の比率が高いことが特色としてあげられる。

具体的には、日本航空インターナショナル（JAL）では航空機乗務員約 8,800 人（運航乗務員：2,200 人、客室乗務員：6,600 人（うち男性 300 人）、全日本空輸（ANA）では航空機乗務員約 5,900 人（運航乗務員：1,700 人、客室乗務員：4,200 人（うち男性 40 人））となっている（2004 年 11 月現在）。

イ. 飛行経路・乗務時間

JAL においては、全航空機のブロックタイム（航空機が出発空港の駐機場から出発し、到着空港の駐機場に到着するまでの時間）の合計の 4 分の 3 が国際運航、4 分の 1 が国内運航である。ポーラールートの運航は、全航空機のブロックタイム合計の約 14% である。ポーラールートの運航が全ブロックタイムに占める割合は ANA においては JAL よりも少ない。【付録 1：資料第 4 - 4 号参照】

なお、日本の事業者の就業規程による最大乗務時間数は年間 900 時間程度と定められている。

4．交絡因子による健康影響

交絡因子とは、曝露要因（ここでは宇宙線被ばく）と結果（ここでは発がんなどの健康影響）の双方に関連あるいは影響を与える要因のことで、性別、年齢、居住地、社会経済的状況のほか、睡眠時間、飲酒、喫煙等の生活習慣など様々な要因があげられる。

発がんに関する欧米の航空機乗務員の疫学調査においては、現在のところ、宇宙線との関与は完全には否定できないものの、宇宙線の寄与が明確に示された調査報告はなく、宇宙線よりも社会経済的状況や生活習慣などの交絡因子の関与がより大きいのではないかと考えられている。例えば、スウェーデンの報告（Occupational and Environmental Medicine 2003）では、航空機乗務員は一般人よりも日光浴（生活習慣）の機会が多く、その日光浴が皮膚悪性黒色腫のリスク上昇に大きく関与していると指摘されている。ただし、現在までに行われている航空機乗務員の疫学調査は極めて少ない。なお、日本人運航乗務員の中では、皮膚悪性黒色腫の発症は確認されていない。【付録1：資料第6-2号参照】

また、原子力施設等で働く放射線業務従事者の疫学調査においては、生活習慣などの交絡因子の調査も実施しており、食道がんなど一部の消化器系臓器のがんによる死亡率に喫煙、飲酒などの影響が示唆されている。【付録1：資料第7-5号参照】

・航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の評価等について

1．航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の評価方法

ア．宇宙線被ばく線量の評価方法

航空機乗務員の宇宙線被ばく線量を評価するための方法としては、各種放射線測定器を航空機に実際に設置して被ばく線量を実測する方法と、既に測定された多くのデータを基にいくつかの計算コードを用いて、これに飛行航路（緯度・経度・高度）、飛行時間等のパラメータを与えて被ばく線量の計算を行う方法とがある。

まず、実測による評価方法については、長距離飛行での一般的な飛行高度における宇宙線の成分を正確に測定できる機器が必要である。この宇宙線の成分は、全体の40 - 60%を中性子が占めており、残りが光子、電子、陽子等であり、ミューオンとパイオンは、全体の数%を占めている。既に諸外国において実測に使用された主な放射線測定器としては、中性子のエネルギースペクトル測定用として多減速材付比例計数管（別称：ボナーボール）、光子及び電子測定用として電離箱、シンチレーション検出器等、中性子測定用としてプラスチック固体飛跡検出器等がある。【付録1：資料第2 - 4号及び資料第4 - 6号参照】

ただし、実測データから被ばく線量を得る過程には計算による推定も含まれており、測定者のデータ処理方法によって得られる被ばく線量の差が大きい。さらに、航空機に簡易に設置できるような小型・軽量の測定機器は、現段階では研究開発の途上にあり、その精度の信頼性の向上が望まれる。また、放射線施設や病院等で用いられるポケット線量計やガラス線量計等の既存の市販されている簡易な個人線量計では、高エネルギー中性子に対する感度がほとんどないため、測定値をそのまま利用することはできない。

一方、計算による評価方法については、諸外国においてEPCARD、CARI-6、PCAIRE等の航空機乗務員の被ばく線量算出のための計算コードが既に開発・運用されており、このような計算コードを基に、飛行ルートの入力のみで被ばく線量を簡単に求めるサービスをWEB上に公開しているものもある。

航空機高度は構造物による宇宙線の遮へい等の影響がなく、航空機内の宇宙線環境は均一であると考えられる。このため、計算による評価方法では、飛行航路、飛行時間等のパラメータを変更することにより、様々なケースの被ばく線量評価に対応が可能である。また、計算により得られる被ばく線量は、計算コード間でもあまり大きな差がないことが知られており、諸外国では専ら計算による評価方法を用いることが一般的である。【付録1：資料第4 - 7号及び資料第9 - 3号参照】

イ．国際放射線防護学会における、航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の測定・評価に関する発表

2004年5月にマドリッドで開催された第11回国際放射線防護学会において、航空機乗務員の宇宙線被ばく線量評価方法に関して、欧州では、航路線量あるいは年間線量を

実測及び計算により評価していること。また、実測値と計算値との線量評価結果の比較では、大きな差はないこと（チェコの報告）、太陽活動の影響は、通常の飛行高度の範囲内であれば大きくはなく、むしろ緯度（航路）による影響の方が大きく寄与すること（イスラエルの報告）、航空機乗務員の宇宙線被ばくへの対応が法令等により制度化されている例として、スペインの対応状況の紹介など、いくつかの発表がなされたが、いずれも従来の知見を改めるものではなかった。【付録 1：資料第 3 - 4 号参照】

ウ．米国航空宇宙局における、宇宙線の測定・評価に関する発表

1998 年 3 月に米国航空宇宙局（NASA：National Aeronautics and Space Administration）において、これまでに得られた宇宙線に関する知見として、

- 1) 太陽の黒点数と地上における中性子線量の相関を見ると、黒点数と中性子のカウント数が逆相関になっていること、
- 2) 太陽活動期の極小期と極大期における地表面近くの宇宙線強度は、太陽活動及び緯度にはほとんど依存しないこと、
- 3) 航空機の一般的な飛行高度における中性子線量の割合は約 40 - 60% の範囲にあり、高緯度になるほど中性子線量の割合が増加すること、
- 4) 宇宙線量の緯度依存性は大きく、北極近傍では高線量領域が存在し、カナダ上空ルートは被ばくが最も多いルートと考えられること。また、赤道付近の広大な領域には低線量領域が存在すること、
- 5) FLUKA コードによる中性子スペクトル解析結果は、実測値をほぼ再現しているが、LUIN コードによるスペクトル解析結果は、実測値を再現していないこと。ただし、スペクトルに線量換算係数を乗じてエネルギー積分し得られる線量での比較では、スペクトルの差による計算結果に大差が生じないことは、経験的に知られており、両コードの精度の差は実用上問題はないこと

など、詳細にまとめられた様々な論文が発表された。【付録 1：資料第 4 - 6 号参照】

2．航空機乗務員の宇宙線被ばく線量の管理方法

ア．諸外国における、航空機乗務員の宇宙線被ばくに対する取り組み

航空機乗務員の宇宙線被ばくに対する取り組みに関し、世界 24 カ国の対応状況を調査した結果、EU 加盟国においては、1996 年の欧州放射線防護指令（以下、「Euratom96」という。）の中で、航空機乗務員の宇宙線被ばく線量管理について 2000 年までに法制化等による対応が各加盟国に求められているため、制度的な対応を行っている国が多いことが判明した。【付録 1：資料第 7 - 2 号参照】

Euratom96 では EU 加盟国に対して、『Euratom96 に従い、年間被ばく線量が 1 mSv を超える航空機乗務員の宇宙線被ばく対策を事業者が行うように、2000 年 5 月までに法令、規則、管理規程等の必要な措置の導入』を要求している。【付録 4 参照】

また、EURADOS 報告書「Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew」(European Radiation Dosimetry Group, Radiation Protection 140, 2004)では、米国で開発された CARI-6 や欧州で開発された EPCARD などのいくつかの計算コードが紹介されており、どの計算コードの不確かさ(95%の信頼レベルにおいて $\pm 42\%$)も、ICRP が放射線防護に関して許容している範囲にある旨が記述されている。【付録5参照】そのため、EU加盟国における航空機乗務員の被ばく線量評価は、計算による評価方法が一般に用いられており、計算による評価方法と合わせて実測による評価方法を用いている国は、回答のあった調査対象のEU加盟国17カ国中4カ国に過ぎない。

なお、Euratom96において法制化等が求められている背景には、人種、文化、言語、歴史などの多様性を有するEU各加盟国において統一的な基準を確実に実施させるための手段として法制化というやや強力な手法が用いられたものと考えられている。

他方、北米、豪州及びアジア各国においては、法令による規制ではなく、独自にガイドラインを示す等によって対応されている、あるいは、低緯度地方の国などでは対応自体が不要と判断されている状況にあることも判明した。

例えば、米国では、現行の原子力規制委員会(NRC:Nuclear Regulatory Commission)の規則(10CFR)において宇宙線は対象外とされ、放射線障害防止関係法令等による規制はなされていない。しかしながら、連邦航空局(FAA:Federal Aviation Administration)からは、1990年3月に、運航中の宇宙線と放射性物質輸送物に関する情報、放射線被ばくのガイドライン、宇宙線による職業被ばくのリスクなどを内容とする航空機乗務員の放射線被ばくに関する助言(Advisory Circular120-52)が発行されている。また、1994年5月には、環境保護庁(EPA:Environmental Protection Agency)の職業被ばくに関する勧告に適合させて、運航中の宇宙線被ばくに関する航空機乗務員の教育訓練についての助言(Advisory Circular120-61)が発行されている。

豪州では、豪州全国労働安全衛生委員会(NOHS:National Occupational Health and Safety Commission)の電離放射線の被ばくの制限のための勧告3022(1995年)において、航空機乗務員については、被ばく線量が想定範囲であるので、毎回の個人被ばく線量測定は必要がないとされており、放射線規制当局である豪州放射線防護原子力安全庁(ARPANSA:Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)において、事業者に対する指針を作成中とのことである。(2004年現在)

また、タイ、インドネシア、マレーシアなどでは、現在のところ全く対応がなされていないが、これは国が低緯度に位置することにも関係があると考えられる。【付録1:資料第3-3号及び資料第7-2号参照】

イ.日本人宇宙飛行士の宇宙線被ばくの管理

宇宙飛行士が活動する大気圏外(高度約400km)は、航空機の飛行高度に比べて宇宙線による被ばく線量が極めて高いことが知られている。このため、宇宙ステーションにおける被ばく管理の実際を知ることは、航空機乗務員の被ばく管理を考える上でも重要である。

日本人宇宙飛行士の被ばく管理は、宇宙航空研究開発機構（JAXA：Japan Aerospace Exploration Agency）により行われており、太陽地球圏の宇宙環境及び国際宇宙ステーション（ISS：International Space Station）（以下、「ISS」という。）の放射線環境は地上で連続的に監視されている。

また、大気圏外では、大規模太陽フレア発生時の被ばく線量の増加が顕著であるので、独立行政法人情報通信研究機構の宇宙天気予報（米国では米国海洋大気庁が同様の予報業務を実施）の情報により、大規模太陽フレア発生時には、宇宙飛行士に対してISS内の遮へいの厚い場所へ退避すること等の指示がなされる。

宇宙飛行士には生涯実効線量制限値（女性：600 - 1,100mSv、男性：600 - 1,200mSv）が宇宙飛行開始年齢階層別（最低宇宙飛行開始年齢は27歳）に決められており、さらに、ISSに参加する各宇宙機関によりまとめられたFlight Rules（ISS飛行時の運用手順書）には、飛行中止レベル（骨髄等価線量：0.25Sv / 30日，0.5Sv / 年）が暫定的に決められている。また、ISS滞在中は常時米国航空宇宙局の個人線量計を装着することとなっている。

教育訓練は、放射線防護の基礎及び実務の知識について6時間以上行われ、ISS搭乗前には、飛行した場合の発がん等のリスクについての説明が行われ、そのリスクがある旨を承知して搭乗するという意思を各宇宙飛行士に同意書により確認している。【付録1：資料第4 - 8号参照】

． 一般的な放射線防護の考え方について

1 ． ICRP 勧告における航空機乗務員の被ばくの取扱い

放射線防護に関する国際的な基準となる基本的な考え方は、X線装置の医療への応用など、放射線の利用が本格的に普及した頃から、検討が行われてきた。この検討を行う組織として1928年に国際エックス線ラジウム防護委員会(IXRP:International X-ray and Radium Protection Committee)が設立され、1950年に国際放射線防護委員会(ICRP:International Commission on Radiological Protection)(以下、「ICRP」という。)に改組された。以後、ICRPは、放射線防護の基本的な考え方とそれに基づく基準に関して国際的に勧告を提示し、それらの勧告は、世界の多くの国々で尊重され、放射線防護に係る法令や安全行政にも広く取り入れられてきている。多くのICRP勧告のうち、特に放射線防護全般に関する基本的な考え方を示した主勧告については、ほぼ10年 - 15年おきに改訂され、ICRP Publication 60(いわゆる1990年勧告)が最新である。このICRP Publication 60の中で、航空機乗務を含む4つの自然放射線源による被ばく(後述)を職業被ばくの一部として含めるよう勧告された。

我が国では、放射線審議会において、ICRP Publication 60の国内法令への取り入れについての検討が続けられ、1998年(平成10年)に、関連省庁に対する意見具申がまとめられた。この意見具申の中で、「ジェット機の運航に伴う航空機乗務員の被ばくについては、これまで、航空機内の線量レベルに関するいくつかの調査が行われてきており、公衆の実効線量限度である年1mSvを超える被ばくの可能性も考えられる。乗務員の被ばくが一定の線量レベルを超えることがある場合には、適切な管理を行うことが必要である。なお、航空機内の線量レベルに関しては、測定方法、中性子線等に起因する線量評価等についてより詳細な調査・検討を行う必要があり、当面、乗務員等に対して放射線に関する知識の普及等を行うとともに国際的動向も考慮しつつ対応することが適当である。」と示されている。

ア．放射線防護の基本的考え方

ICRPでは、放射線防護の第1の目的を、「放射線被ばくの原因となる有益な行為を不当に制限することなく、人を防護するための適切な標準を与えること」としている。

そして、放射線防護の基本的な目標は、しきい線量よりも十分低く被ばく線量を保つことにより個人の確定的影響の発生を防止すること、及び現在と将来の集団における確率的影響の発生を減少させるために合理的な手段がとられることとしている。

放射線被ばくを増加させる人間の活動を「行為」と呼び、従来からICRPは前述のように「行為」に関する放射線防護を第1の目的としてきた。しかし、放射線による被ばくは、「行為」によるものだけでなく、例えば放射線事故対応に伴う被ばくや自然放射線源による被ばくなど既に不可避的な被ばく源と被ばく経路が存在している場合のものがある。このような被ばくは、「行為」のように全て人為的に計画し管理できるものではないため、一律に対処することは不可能であり、「介入」と呼ばれる対策で防護することが提言されている。

ICRP は放射線防護の基本的原則として、次の放射線防護体系を提言している。

まず、「行為」に関する体系は、第1に「行為の正当化」、第2に「防護の最適化」、第3に「個人の線量限度」から構成されている。

「行為の正当化」とは、放射線被ばくを伴ういかなる「行為」も、その「行為」が、個人又は社会に対して引き起こす放射線による害を相殺するのに十分な便益を生むものでなければ、採用すべきでないという概念である。

「防護の最適化」とは、個人線量の大きさ、被ばくする人数、及び潜在被ばくの3つを、経済的および社会的要因を考慮した上で、合理的に達成できる限り低く保つべきであるという概念である。

また、「個人の線量限度」とは、関連する「行為」すべての複合の結果生ずるであろう被ばくを、ある一定の限度を超えないように保つべきことを示している。

次に「介入」についての防護体系は、第1に、提案された「介入」が害よりも益の方が大きいものであるべきであるという「正当化に関する原則」と、第2に、提案された「介入」の方法、規模や期間が線量低減を図る上で正味の便益が最大となるようにすべきであるという「最適化に関する原則」が適用されるが、「線量限度に関する原則」は、適用されない。

即ち、「介入」の場合は、既に存在している被ばくであって、その被ばくを低減する目的の「介入」の実施が正当化される場合の被ばく線量が、状況によっては「線量限度」を不可避免的に超えてしまう場合もあり得るためである。「介入」を発動する被ばくのレベルは、「行為」のために用いられる「線量限度」とは異なり、管理可能性などに応じて「対策レベル」と呼ばれる基準が用いられる。

「行為」に対する「個人の被ばく線量限度」は、公衆で1 mSv / 年、従事者で50 mSv / 年かつ5年で100 mSv であるのに対し、「介入」については、ICRP Publication 82 (1999年)において、長期被ばく状況における介入のレベルを以下のように示している。

- 10 - 100 mSv / 年：介入がほとんど常に正当化される一般参考レベル
(Generic reference level for interventions almost always justifiable)
- 1 - 10 mSv / 年：介入が正当化されそうにない一般参考レベル
(Generic reference level for interventions not likely to be justifiable)
- 1 mSv / 年以下：介入免除レベル
(Exemption from intervention in commodities)

【付録2 参照】

ICRP Publication 26 (1977年)までは、通常レベルの自然放射線源は、放射線防護の対象外として扱われてきた。しかし、ICRP Publication 60において、以下に示す自然放射線源による被ばくを職業被ばくの一部として含める必要があると勧告された。【付録1：資料第1 - 1号参照】

- 1) 認定されたラドンに注意が必要な作業場所

- 2) 自然放射性核種を有意に含む物質を取り扱う操業やその貯蔵
- 3) ジェット機の運航
- 4) 宇宙飛行

さらに、ICRP Publication 75 においては、職業被ばくに対する取り扱いのうち、従来の人工放射線源を利用する場合のように「行為」の対象として扱う場合と、自然に発生するラドンのように既存の被ばくに対する「介入」の対象として扱う場合については、それぞれ明確に示されているが、果たして「行為の対象」であるのか「介入の対象」であるのかの判別が難しい場合もあり得るとしている。自然放射性核種の産業利用やジェット機の運航の場合も、「行為の対象」であるのか、「介入の対象」であるのかについては特に明確に示されていない。

イ．航空機乗務員の宇宙線被ばく防護

航空機乗務員の宇宙線被ばくについては、ICRP Publication 60 において、前述のように、職業被ばくの一部として含める必要があることが示され、この基本勧告に基づいて発行された ICRP Publication 75 においては、より詳細に考え方が示されている。ICRP Publication 75 では、航空機乗務における宇宙線による年間の実効線量は飛行時間と該当する航路の典型的な線量率とから導かれるべきであるとしている。また、管理区域や監視区域などについては、実際的な管理手段がないため、航空機乗務では考慮する必要はないとしている。【付録 1：資料第 1 - 1号参照】

ウ．妊娠中の女性乗務員の宇宙線被ばくの防護

ICRP Publication 75 において、航空機乗務員のうち妊娠している女性については以下のような一般原則が提示されている。【付録 1：資料第 1 - 1号参照】

- 1) 従事者の妊娠が判明した時は、胎児については従事者より厳しい防護基準を適用すること。
- 2) 妊娠申告後の妊娠した従事者の作業条件は、胎児に対する追加の等価線量が、妊娠の残りの期間中において約 1 mSv を超えることがないようにすべきであること。
- 3) 妊娠女性の被ばく条件は、事業主により注意深く観察されるべきであること。特に彼女らが偶発的な高線量被ばくや放射性物質を摂取する可能性が少ない職務に就かせるべきであること。

なお、日本の事業者においては、妊娠中の女子運航乗務員は航空法施行規則により、また妊娠中の客室乗務員は社内規程により、それぞれ実質的に乗務できないような措置が以前から行われている。これらは、いずれも放射線防護の観点からの措置ではないが、我が国においては妊娠中の女性乗務員の宇宙線被ばくについては、既に ICRP の要件を満たしていると考えて良い。【付録 1：資料第 4 - 4号参照】

2．我が国の既存の法令における宇宙線被ばくに関する現状

我が国の法令のうち、放射線障害防止に関するものとして、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」及び「労働安全衛生法」並びに「電離放射線障害防止規則」などがあり、また、航空機の運航の安全に係る航空機乗務員の規制に関する法律として「航空法」がある。

現在、航空機乗務員の宇宙線被ばくは、いずれの法令においても、その規制対象とはなっていない。

3．我が国における NORM の規制の考え方

我が国では、ICRP Publication 60 において、職業被ばくの一部として含める必要があると勧告された自然放射性核種を含む物質の利用に伴う被ばくについては、平成 15 年に放射線審議会により NORM 報告書がまとめられた。【付録 1：資料第 6 - 3 号参照】

NORM 報告書の中では、自然放射性物質の産業利用に伴う被ばくについては、基本的には人工放射線源の被ばくと同様に扱うべきとされている。しかしながら、自然放射線源は、その原料に含まれる放射能について何ら意識せずに既に世の中で長期にわたり広く用いられている事実があることから、「既に被ばくの経路が存在している」場合に相当すると考えられる。

このため、既に規制対象となっているものや一般消費財などを除き、既存の被ばくに対する「介入の対象」とであると NORM 報告書では示されている。なお、サマリウムやルビジウムなどの放射性同位体の天然存在比が高い自然放射性物質については、精錬の過程で国際的な免除レベルを超えることもあり得るものである。しかしながら、これらは、その放射性を意図して産業利用されているものではないため、このような自然放射性物質に対し、厳格な免除レベル濃度を設定し、逐一それを超えるものを全て規制対象として取り扱うという方法をとることは極めて困難であり、現実的ではないと考えられている。このように、自然放射性物質の利用については、それぞれの特性に沿った方法で対応する必要があると考えられている。【付録 3 参照】

・航空機乗務員における宇宙線被ばくの管理について

1．航空機乗務員の宇宙線被ばくへの対応の必要性

航空機乗務員の宇宙線による被ばく線量については、航空機に年間 1000 時間乗務した場合は約 5 mSv とされている。(章参照)

航空機乗務員の宇宙線被ばくについては、その被ばく経路が既に存在しており、被ばく線量を管理することも可能である。したがって、「介入」の対象としてとらえることができ、年間 5 mSv という被ばく線量は、ICRP Publication 82 の介入のレベルから考えると、「介入が正当化されそうにない一般参考レベル」に相当する。(章参照)

また、被ばく経路が存在しているその他の自然放射線源(ラドン、精錬残渣等)による被ばくについては、既に NORM 報告書において、法令による規制は行わず、対策レベルを検討すべきとされている。このような他の自然放射線による被ばくの管理方法との整合性を図る観点も重要であり、ほぼ同じレベルの被ばく線量でかつ管理可能な航空機乗務員の宇宙線被ばくについても、法令による規制対象とする必要はないと考えられる。(章参照)

しかしながら、航空機乗務員の宇宙線被ばくが規制の範疇外に置かれるとしても、放射線防護の精神は、合理的かつ実行可能な範囲で、できるだけ被ばくりスクを低く保つべきであるとの観点に立つものであることから、被ばく線量管理や宇宙線被ばくに関する教育が事業者により自主的にかつ適切に実施されることが望まれる。

2．航空機乗務員の宇宙線被ばくへの対応方法

上記の事業者の自主的な取組みとして実施する対応方法は以下のとおりと考えられる。

なお、航空機乗務員の宇宙線被ばくに対する諸外国の対応については、各国様々な方策が講じられているが、以下に示す対応方法は、諸外国の実態も考慮し、ほぼ同レベルでの技術的基準を示しており、国際的な整合性にも配慮されていると考えられる。

ア．航空機乗務員の被ばく管理

航空機乗務員の被ばく線量の管理については、事業者が自主的に管理目標値を設定し、被ばく線量を抑えようと努めることが重要である。

航空機乗務に伴う付加的な被ばく線量の管理目標値としては、年間 5 mSv を設定し、これを目標に被ばく管理を行うことが適切ではないかと考えられる。なお、この管理目標値は、航空機乗務員の被ばく線量を抑えるために、事業者が自主基準として定めるべきものであり、この値を超えても、統計的に有意な確率で健康影響が現れるレベルのものではないことに留意すべきである。

また、付加的な線量増加も予想される太陽フレアについては、宇宙天気予報などの情報を利用することにより、太陽フレアによる線量変化に留意し、予め極大となる時期等を予測し、個々の航空機乗務員の勤務や航空機の運用を工夫することなどによって、航

空機乗務員の宇宙線による被ばく線量を抑えることも重要である。

イ．航空機乗務員の宇宙線による被ばく線量の評価

諸外国の航空機乗務員の被ばく線量の評価においては、実測ではなく計算による評価が大半であり、我が国における被ばく線量評価も、通常は、計算による線量評価を実施し、必要に応じて、校正の目的で実測を行って、その精度確保に留意することで十分である。したがって、個人線量計によるモニタリングなどの放射線業務従事者並の被ばく管理は必ずしも必要ないものと考えられる。

ウ．航空機乗務員への宇宙線被ばくに関する説明と教育

航空機乗務員への宇宙線被ばくに関する説明と教育を事業者が行うことについては、航空機乗務員が宇宙線被ばくに関する知識を正しく理解し、不安を払拭し、安心し、また、自ら納得して業務に専念するためにも有効な手段であると考えられる。既存の職場教育プログラムの中に宇宙線被ばくに関する項目を盛り込むことや、必要な場合には、産業医等による健康教育や健康相談の実施により、航空機乗務員への宇宙線被ばくに関する説明に意を払うことが適切であると考えられる。

特に、女性の航空機乗務員に対しては、胎児への放射線影響についての教育も行い、宇宙線被ばくについての認識を持たせることが重要である。

エ．航空機乗務員の宇宙線による被ばく線量の閲覧、記録及び保存

航空機乗務員自らが被ばく線量を把握することは、教育によって得られた知識を踏まえて、被ばくに関する意識を高めることから、被ばく線量の閲覧、記録、保存は重要である。したがって、事業者は航空機乗務員の乗務時間、航路等から被ばく線量を計算し、個々の航空機乗務員が必要に応じて、自分の被ばく線量や全体の傾向等を閲覧できるような工夫をするとともに、得られた結果の記録、保存を行うことが重要であると考えられる。その際、個人情報の保護にも適切な配慮を行うことも重要である。

オ．航空機乗務員の健康管理

航空機乗務員に対しては、既に労働安全衛生法に基づき、定期的に一般健康診断が行われていることを勘案すれば、放射線による健康影響の検知を目的として、新たに付加的な健康診断を行う必要はない。

しかしながら、被ばく線量の閲覧によって、各個人の被ばく線量がどの程度であるかを各個人が把握し、必要な場合には、産業医等による健康相談が速やかに受けられる体制を整えることが重要である。

カ．低線量における健康影響等の最新知見に関する情報の扱い

航空機乗務員の健康管理については、従前より定期的に健康診断が行われており、宇宙線被ばくについても、今後、教育等において十分な説明がなされるのであれば、放射線防護上必要な対策はなされていると考えられる。低線量放射線が及ぼす健康影響については、専門家の間においても様々な考え方があり、特に、100mSv以下の低線量放射

線の健康影響を直線で仮定することの科学的な評価については、専門家及び各国アカデミー報告書の間でも様々な意見があるため、今後とも関連する情報を適切に入手し、放射線防護の対応方法に役立てていくことは重要であると考えられる。【付録1：資料第9 - 2号参照】