資料第 10-2 号

第 1 ドラフト

航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討について（案）

平成○年○月

文部科学省　科学技術・学術政策局

放射線安全規制検討会
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

はじめに

従来から、自然界には、我々人類が不可避的に年間平均 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（2000 年 UNSCEAR（国連原子放射線の影響に関する科学委員会）による世界平均値)、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（2000 年 UNSCEAR）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、ICRP（国際放射線防護委員会）1990 年勧告において、ジェット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 EU 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、航空機搭乗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　回にわたる検討の成果を取りまとめ、航空機乗務員等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

Ⅰ．これまでの航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する知見　　１

Ⅱ．航空機乗務員等の宇宙線被ばく線量の評価等について　　６

Ⅲ．一般的な放射線防護の考え方について　　１０

Ⅳ．航空機乗務員等における宇宙線被ばくの管理について　　１４

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　調査訓令結果（作成中）

付録５　1996 年 EU 指令（96/29EURATOM）（抜粋）

参考資料　ワーキンググループ委員名簿

Ⅰ. これまでの航空機乗務員等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）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。【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 100ｋm以下）に突入した粒子は、大気を構成する原子（N、O、Ar）の原子核とカスケード反応を起こし、陽子、中性子、電子、ガンマ粒子、パイ中間子、ミューオン（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。

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）であり、航空機の長距離飛行で一般的な高度（12,000m）においては、それよりも多くの年間宇宙線量となる。航空機の一般的な飛行高度における航空機乗務に伴う宇宙線被ばくは、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。【付録２参照】

イ．太陽活動（フレア）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つか、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。【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地球の磁場が圧縮され、地球で観測される宇宙線量の総和は必ずしも増加するとは限らず、逆に減少して観測されることもある（フォーブッシュ減少と呼ばれる）。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 Cutoff 効果により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到達する可能性がある。【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５mSv 以下）であると推定される。（参考値：太陽活動平常時に東京－ニューヨーク間を往復した場合の被ばく線量は 0.2mSv）

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、①高度、②緯度、③巡航時間の３つがあげられる。

１）高度による変化

宇宙線は大気中に入射すると、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んでくるので、より低い高度を飛行した場合は被ばく線量が減る。ICRP Publication.75 によれば、長距離飛行での一般的な高度である 12,000m では約 5μSv/h、中高度の 8,000m では約３μSv/h とされている。【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、地球の磁場が弱まるため宇宙線量は大きくなる。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 4μSv/h、地磁気緯度の高い地域で 12μSv/h 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 倍高くなることがわかる。【資料第４－６号参照】

３）巡航時間による変化

巡航時間が長ければ、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１mSv とされている。この値は、上述の長距離飛行での一般的な高度である 12,000m での被ばく線量である約 5μSv/h に乗務時間である 200 時間をかけた値である。したがって、1000 時間乗務した場合は、同様の計算により、約５mSv の被ばく線量となる。

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、巡航時間も長いので、他の路線と比較して、航空機乗務員等の被ばく線量が大きい。

エ．我が国の NORM 及び TENORM 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」による調査報告によれば、自然放射性物質（NORM）および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のうち、比較的自然放射性物質の濃度が高いと思われる放射性物質による作業者の被ばく線量は、モナザイトで 0.3mSv／年、リ

ン鉱石で 0.28mSv／年、チタン鉱石で 0.27mSv／年となり、作業者の外部被ばく線量が１mSv／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る。

また、自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 110μSv／年、肌着で、220μSv／年、布団で 90μSv／年、壁紙で 10μSv／年となり、使用者の外部被ばく線量が１mSv／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高線量放射線を被ばくすることによって障害を発症する「確定的影響」と、確定的影響を発症するレベルには及ばないものの低線量放射線を被ばくすることによって、ある一定の確率で将来における発がんなどの障害が発生するかもしれないというリスクを負う「確率的影響」のふたつが知られている。

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ず、また、しきい線量を超える被ばくにおいては、被ばく線量の増加により、症状の重篤度が増大することが知られている。

確定的影響のメカニズムの主体は高線量を浴びた細胞の死であり、皮膚表面に限定した被ばくであれば、毛母細胞や基底細胞の脱落によって脱毛や潰瘍を生じ、また全身被ばくであれば、小腸の陰窩細胞の脱落によって粘膜上皮が再生されず消化管出血を来たし、甚だしい場合には死に至ることが知られている。

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。【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

低線量被ばくにおいても、被ばく線量の増加に伴い、将来における発がんや遺伝的影響などの発生率が増加するものと従来より考えられている。しかしながら、確定的影響ほどには、線量と健康影響との関係が明確ではなく、特に 100 mSv 以下の低線量領域での健康影響や、ヒトにおける遺伝的影響の有無につい

ては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ところである。このような状況をもたらす理由として、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り、加えて、喫煙を含む生活習慣や遺伝的背景など同様に発がんに結びつくより強い他の交絡因子の条件を全く同一に揃えて比較研究することが現実的に無理であることが挙げられる。また、アポトーシスやバイ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放射線影響メカニズムの解明については、未だ発展途上段階にあり、今後の成果が期待されるところである。【資料第９－２号参照】

なお、1950 年から実施されている広島・長崎原爆被害者 12 万人の疫学調査データでは、100～200mSv 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 以下の低線量領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を外挿し（LNT: Linear Non-threshold）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。【資料第７－５号参照】このため、LNT を用いて将来の発がん人数など、逆に健康影響を推計することは、本来的な意味から正しい用い方ではないとされている。

３）放射線影響のリスクマネジメント

放射線誘発がんは、分子レベルの影響である DNA 損傷が個体レベルの影響まで進展して現れるものであり、その機構は完全に解明されているわけではない。遺伝的不安定性、バイスタンダー効果など、放射線生物学上、近年、研究対象となり盛んに研究されている事項も多い。放射線生物学上、低線量の影響は、①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、②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、③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など、様々な考え方がある。【資料第９－２号参照】このため、10mSv 前後以下の低線量領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①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。

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）や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ない。これは、喫煙等の健康影響に対する寄与がより大きな交絡因子の影響が前面に出てしまうため、作業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排除して放射線のみによる有害な健康影響があったにしても、その検出は困難であることを示している。【資料第７－５号参照】

3. 我が国の航空機乗務員等の勤務実態

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の合計の約 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。【資料第４－４号参照】

日本の航空会社の就業規程による年間最大乗務時間数は年間 900 時間程度と定められている。したがって、航空機に年間 1000 時間搭乗したと仮定しても、最大被ばく線量は約５mSv と推定される。

4. 交絡要因による健康影響

交絡要因とは、曝露要因（ここでは宇宙線被ばく）以外に結果（ここでは発がんなどの健康影響）に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、宇宙放射線との関与は完全には否定できないが、宇宙放射線の関与が一番大きいと仮定すると、がんの発生が増えるはずであるので、宇宙放射線よりも社会経済的状況や生活習慣などの交絡要因の関与が大きいのではないかと考えられている。 また、スウェーデンの報告書（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）をする機会が多く、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。【資料第 6－2 号参照】

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要因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。【資料第 7－5 号参照】

Ⅱ．航空機乗務員等の宇宙線被ばく線量の評価等について

１．航空機乗務員等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

航空機乗務員等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確立された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、民間航空機の飛行高度における宇宙線の成分を正確に測定できる測定機器が必要である。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、陽子である。ミューオンとパイオンは、全体の数%である。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、プラスチック固体飛跡検出器等がある。【資料第２－４号及び資料第４－８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バッジ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の測定精度の信頼性に疑問が残る。

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。

航空機高度は建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（緯度･経度･高度)、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。【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、①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、②太陽活動の影響は、通常の飛行高度（12,000m 以下）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、③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。【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、③一般的な航空機の高度（10,000～12,000m）における中性子線量の割合は約 60%であり、航路による割合の変動は小さいこと、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、⑤FLUKA 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掛けてエネルギー積分して得られる線量で比較すると、両コードによる計算値に大きな差は生じないことが経験的に分かっていることなど、様々な知見を詳細にまとめた論文が発表なされた。【資料第４－６号参照】

２．航空機乗務員等の宇宙線被ばく線量の管理方法

ア．諸外国における、航空機乗務員等の宇宙線被ばくに対する取り組み

航空機乗務員等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、欧州放射線防護指令 (Council Directive 96/29/EURATOM,13 May,1996) （以下、「Euratom96」という。）の中で、航空機搭乗員の宇宙線被ばく線量管理について法令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４】

Euratom96 では EU 加盟国に対して、『2000 年までに、事業者が航空機搭乗員の被ばく線量が年間１mSv を超える宇宙線被ばくについて検討するように、体制を整えること』を要求しており、さらに、年間６mSv を超える線量を受ける個人に対しては、健康診断を行うとともに、事業者に対する警告と個人被ばく線量測定の実施が追加されている。【付録５】

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、どの計算コードも ICRP が要求している放射線防護に関する不確実さ（±42% at the 95% confidence level）の範囲にある旨が記述されている。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、調査対象の EU 加盟国 17 カ国中４カ国に過ぎない。

なお、Euratom96 において法制化が求められている背景には、人種、文化、言語、歴史など様々な多様性を有する 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を求める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の「介入」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。（介入：放射線被ばくを減少させる人間活動のこと。）

例えば、米国では、現行の原子力規制委員会（NRC）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）からは、1990 年３月に、航行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搭乗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）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搭乗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、電離放射線の被ばくの制限のための勧告「産業衛生と安全委員会 NOHSC：3022(1995)」において、航空機搭乗員については、被ばく線量が想定の範囲であるので、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 ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)において、航空産業界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。

【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

員等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）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（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（NOAA：National Oceanic and Atmospheric Administration）において日本と同様の予報業務が行われている）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/30day，0.5Sv/y）が暫定的に決められている。また、ISS 滞在中は常時 NASA 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。【資料第４－８号参照】

III．　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被ばくの取扱い

放射線防護に関する基本的な考え方は、放射線の利用が本格的に始まった初期の頃から、国際的に統一された基準について検討されてきた。この統一的な検討を行う国際組織として 1928 年に国際エックス線ラジウム防護委員会（IXRP）として設立され、1950 年に放射線防護委員会（ICRP）という現在の名称に改組されて以来、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勧告として提示してきた。ICRP の勧告は、世界の多くの国で、放射線防護のための法令や安全行政に広く取り入れられている。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、1991 年に発行された 1990 年勧告（ICRP Publication.60）が最新の刊行物である。我が国では、この勧告が発行された直後から、放射線審議会基本部会において、その内容の我が国の放射線障害の防止に関連する法体系への取り入れについて検討が続けられ、1998 年（平成 10 年）に、関連省庁に対する意見具申としてまとめられた。この意見具申において、放射性同位元素の規制免除や自然放射線源の取扱いなどについては今後の長期的課題と整理されていた。そのうち放射性同位元素の規制対象下限値として IAEA 等国際機関が提案した免除レベルを導入するための検討が行われ、2004 年までにこれらの検討結果に基づき法令の改正が行われた。

ア．放射線防護の基本的考え方

ICRP 勧告では、放射線防護の第一の目的は、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。放射線による影響のうち、被ばく線量に閾値があると考えられる白内障や不妊など確定的影響と発がんや遺伝的影響などのようにしきい線量が得られていない確率的影響に区分されている。基本的な防護の枠組みは、確定的影響については線量をしきい線量に保つことにより、確実に発生を防止し、確率的影響については、科学的な判断だけでなく、社会的な判断も含めて、その誘発を減らすためにあらゆる合理的な手段を確実にとることを目指している。

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の第一の目的としてきた。しかし、放射線の被ばくは、行為、つまり放射線被ばくを増加させる活動によるものだけでなく、放射線の被ばくを伴う事故による被ばくや自然放射線源による被ばくの大部分であるすでに被ばく源と被ばく経路がすでに存在している場合がある。このような被ばくについて、行為のような新たに計画されるものではないため、一律の対処は不可能であり、介入(intervension)と呼ばれる対策で防護することを提言している。

ICRP は放射線防護の基本的原則として、放射線防護体系を提言している。行為に関する体系として、端的な言葉で示すと、第一に「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」から構成している。正当化とは、放射線被ばくを伴ういかなる行為も、その行為がもたらす個人又は社会に対し

て、それが引き起こす放射線損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、被ばくする人の数、および受けることが確かでない被ばくの起こる可能性の３つが、経済的および社会的要因を考慮したうえに、合理的に達成できるかぎ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は、関連する行為すべての複合の結果生ずる被ばくがある限度を超えないように保つことを示している。介入についての防護体系は、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と、介入のかたち、規模や期間が線量低減の正味の便益が最大となるようにすることである最適化の２原則が適用されるが、個人の線量限度については、適用しない。つまり、介入の場合は、すでに存在している被ばくであって、それを低減する場合の介入が正当化された場合の線量が、制御できる程度によっては線量限度を超える場合が考えられる。介入を発動する被ばくのレベルは、行為の線量限度とは異なり、制御のしやすさなどに応じて対策レベルと呼ばれる規準が用いられる。行為に関連する個人被ばく線量限度は、10mSv／年であるのに対し、介入については、状況に応じて、100mSv 以上では常に介入が正当化されるが、10－100mSv／年では必要であるかもしれないレベルであり、１－10mSv／年では正当化されそうにないレベルで、１mSv／年以下では介入が免除されるとしている。

1977 年勧告までは、通常レベルの自然放射線は、放射線防護の対象外として扱われてきた。しかし、1990 年勧告において、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。【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

ただし、この 1990 年勧告では、これらの職業被ばくとして管理することを提言している。ICRP Publication.75 においては、職業被ばくは、従来の人工放射線源を利用する場合のように行為として扱う場合とラドンのように介入の対象として扱う場合については、明確に示されているが、行為の対象か既存の被ばくの状況として介入の対象かのどちらの明確な区別が難しい場合があるとしている。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、行為の対象か明確には示していない。

イ．航空機乗務員等の宇宙線被ばく防護

航空機乗務員等の宇宙線被ばくについては、ICRP1990 年勧告においては、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を示した。この基本勧告に基づいて発行された ICRP Publication.75 においては、その規制について少し詳細に示している。この刊行物では、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。他に実

際的な制御の手段がないため、管理区域や監視区域などの使用を考慮する必要はないとしている。航空機乗務員の飛行時間について現在ある制限により、被ばくが十分に制御されると思われる。

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、妊娠中の女性乗務員の宇宙線被ばくの防護について言及している。航空機乗務員のうち妊娠している女性は、通常妊娠の終了より十分前に、搭乗職務を免除されることから、委員会は以下のような放射線作業の一般原則を提示して、その慣行により、防護は十分達成できると考えている。【資料第１－１号参照】

１）作業者が妊娠したとわかった時は、胎児についてより高度な防護基準を勧告する。
２）妊娠申告後の妊娠作業者の作業条件は、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 1mSv を越えることがないようすべきである。
３）妊娠女性の被ばく条件は、雇用主により注意深く観察すべきである。特に彼女らが偶発的な高線量被ばく及び放射性物質摂取の可能性が少ない職種に就かせるべきである。

なお、日本の航空会社では、航空法施行規則等により、妊娠中の女子乗務員は乗務できない。放射線防護の観点からの規制ではないが、我が国においては現行の法令等により、すでに ICRP の放射線防護の要件も満たしていると考えて良い。

【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

我が国の主に放射線の規制に関する法律は、「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」（以下放射線障害防止法という）、「労働安全衛生法電離放射線障害防止規則」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。

放射線障害防止法は、放射性同位元素や放射線発生装置を規制対象としており、宇宙線は、規制の対象とならない。また電離放射線障害防止規則や航空法においても、宇宙線は規制の対象となっていない。

よって、我が国の法体系において、航空機乗務員の宇宙線被ばくは、あらゆる法律において規制対象となっていない。

３．我が国における NORM の規制の考え方

放射線審議会基本部会では、1990 年勧告において、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自然放射性核種を有意に含む物質の利用についての規制免除に関する報告書をまとめた。（第６回 WG 資料 参考資料３参照）この中では、自然放射性物質の産業での利用による作業者や一般公衆の被ばくは、人工放射線源の被ばくと同様に扱うべきであるが、一方では、これらの線源は、長期にわたり利用されてきた経緯があり、放射性について意識せずにすでに広く用いられている事実も鑑みて、「すでに被ばくの経路が存在している」と考えられるので、既存の被ばくとして介入の対象である面も持っていると判断している。また自然放射性物質は放射能濃度に大きな幅があり、免除レベル濃度を設定してそれを超えるものをすべて規制するという方法をとることは困難である。また、産業に利用される原材料に含まれる自然放射性物質は、放射性物質として作られたものではなく、その放射性を意図して用いられてはいない。

ICRP では、「介入」の対象に対して、規制の規準も「行為」のそれとは異なるものが提案されている。より適切な規制を行うことにより、効果的なリスクの軽減が期待される。【付録３参照】

以上の観点から、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規制の方法や免除又は介入免除について、被ばく線量に基づいた方法で対応する必要があると考えられる。

（参考）

自然放射性物質による被ばく線量が１ｍＳv/年を超える場合には法令に基づく規制は不要であるが、リスク管理の観点から、ガイドラインを示して自主的な管理を促すような介入レベルの対応が必要である

Ⅳ．航空機乗務員等における宇宙線被ばくの管理について

１．航空機乗務員等の宇宙線被ばくへの対応の必要性

航空機乗務員等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（日本の航空会社の就業規程による年間最大乗務時間数は年間 900 時間程度）搭乗した場合は約５mSv と言われている。

ICRP Publication.82（長期放射線被ばく状況における公衆の防護）では、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おり、年間５mSv という値は、「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)」に該当する。

10－100mSv：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）
1－10mSv：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）
１mSv 以下：介入免除レベル
（Exemption from intervention in commodities）

【付録 2 参照】

宇宙線も自然放射線の一部ではあるが、自然放射性物質の規制免除に関する検討をとりまとめた、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」（以下、NORM 報告書）では、自然放射性物質の規制の必要性について、次の旨述べている。即ち、自然放射性物質を含む原材料を用いる産業活動や自然放射性物質を含む一般消費財の利用は、制御しうるものであり、作業者や一般公衆の被ばくを伴うため、「行為」の側面を持ち、一方、自然放射性物質を含む各種原材料は、過去から長く利用されており、「既に被ばくの経路が存在している」と考えられるので、「介入」の対象としての要素も持っている。したがって、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規制の方法や免除又は介入免除について、被ばく線量に基づいた方法で対応する必要があるとしている。

航空機乗務員等の宇宙線被ばくは、自然放射性物質を意図して利用することにより発生する被ばくではないが、その被ばく経路は既に存在しており、被ばく線量を制御することが可能である。したがって、「介入」の対象としての要素はあるが、上記 ICRP Publication.82 の基準被ばく線量から考えると、「介入が正当化されそうにない一般参考レベル」の被ばく線量である。

また、被ばく経路が存在しているその他の自然放射線（ラドン、精錬残渣等）による被ばくについては、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るとされている。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等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。
　しかしながら、航空機乗務員等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、できるだけ被ばくリ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の手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．航空機乗務員等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、航空機乗務員等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．航空機乗務員等の被ばく管理について
　航空機乗務員等の被ばく線量の管理については、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適切である。
　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５mSv 程度（EU 加盟国では６mSv が多い）に設定し、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、これは、管理目標値としての割り切りであって、健康影響を考えた上では、５mSv も６mSv も本質的な差はないと考えられる。
　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、航空機の運用を工夫することによって、航空機乗務員等の宇宙線による被ばく線量を目標値までに抑えることも重要である。

イ．航空機乗務員等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等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要ないものと考えられる。

ウ．航空機乗務員等への宇宙線被ばくに関する説明と教育
　航空機乗務員等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、航空機乗務員等が宇宙線被ばくに関する知識を正しく理解し、不必要な不安を払拭し、安心して業務に専念するためにも有効な手段であり、また、自ら納得して被ばく管理を行うことができるため、重要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、航空機乗務員等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等に対しては、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ってもらうことが重要である。

エ．航空機乗務員等の宇宙線による被ばく線量の閲覧、記録及び保存

航空機乗務員等が自らの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、より適切な自主管理を行えることから、被ばく線量の閲覧、記録、保存は重要である。したがって、航空会社は航空機乗務員等の乗務時間、航路から被ばく線量を計算し、個々の航空機乗務員等が必要に応じて、自分の被ばく線量や全体の傾向等を閲覧できるよう工夫するとともに、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．航空機乗務員等の健康管理

航空機乗務員等に対しては、既に労働安全衛生法に基づき、定期的に一般健康診断あるいは、航空法に基づき、定期的に航空身体検査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について

航空機乗務員等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、放射線防護上の対策はなされていると考えられるが、低線量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 未満の低線量放射線の健康影響を直線で仮定することについては、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。【資料第９－２号参照】

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