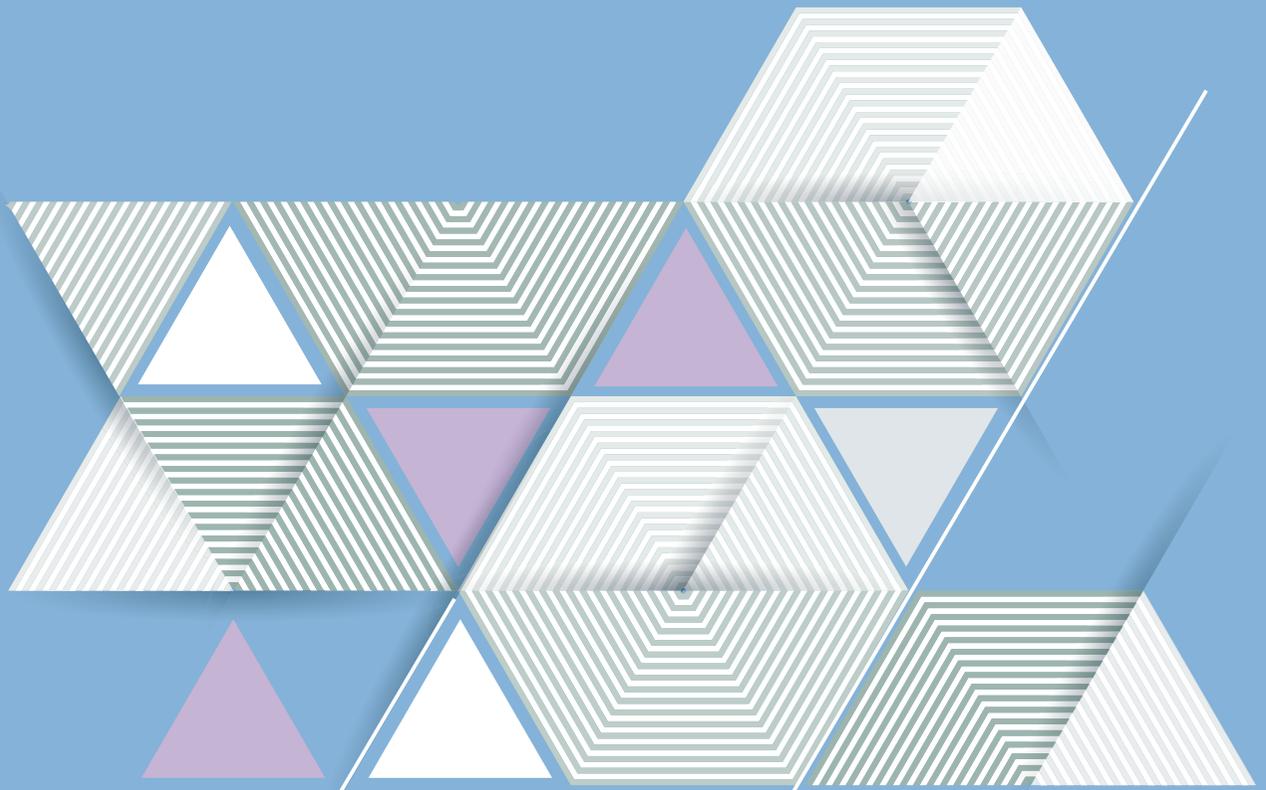


ICRP

Publication 132

航空飛行時の 宇宙放射線からの防護



航空飛行時の 宇宙放射線からの防護

2016年3月 主委員会により承認

ICRP

Publication 132

**Radiological Protection from Cosmic Radiation
in Aviation**

Editor-in-Chief

C.H. CLEMENT

Associate Editor

N. HAMADA

Authors on behalf of ICRP

J. Lochard, D.T. Bartlett, W. Rühm, H. Yasuda,

J-F. Bottollier-Depois

Copyright © 2019 Nuclear Regulation Authority, Japan. All rights reserved.
Authorized translation from the English language edition published for
The International Commission on Radiological Protection by SAGE Publications Ltd.
Copyright © 2016 The International Commission on Radiological Protection
Published by SAGE Publications Ltd. All rights reserved.

*No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in
any form or by any means electronic, electrostatic, magnetic tape, mechanical photocopying,
recording or otherwise or republished in any form, without permission in writing from the
copyright owner.*



Japanese Translation Series of ICRP Publications
Publication 132 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation

This translation was undertaken by the following colleagues.

Supervised by

Michiaki KAI

Translated by

Hiroshi YASUDA

Editorial Board

The Japanese Translation Committee of ICRP Publications
Translation Project of ICRP Publications,
Nuclear Regulation Authority, Japan

working in close collaboration with Japanese ICRP & ICRU members.

◆ Committee members ◆

Ohtsura NIWA ^{*, 1)} (Chair; until 2018.03)	Gen SUZUKI (Chair; from 2018.06)	
Keiko IMAMURA ¹⁾ (Vice-chair; until 2018.03)	Michiya SASAKI (Vice-chair; from 2018.06)	
Kazuko OHNO ³⁾	Keiji ODA ²⁾	Isao KAWAGUCHI
Nobuyuki KINOUCHI ²⁾	Yasuhito SASAKI*	Hiroshi YASUDA ²⁾
Michio YOSHIZAWA ¹⁾		

◆ Supervisors ◆

Michiaki KAI (ICRP, MC)	Ohtsura NIWA ^{*, 2)} (ICRP, MC)
Kotaro OZASA (ICRP, C1)	Kazuo SAKAI (ICRP, C1)
Tatsuhiko SATO (ICRP, C2)	Makoto HOSONO (ICRP, C3)
Yoshiharu YONEKURA* (ICRP, C3)	Toshimitsu HOMMA (ICRP, C4)
Norio SAITO (ICRU)	

* Former ICRP member. ¹⁾ Until March 2018, ²⁾ From June 2018, ³⁾ From October 2018.

邦訳版への序

本書は、ICRPの主委員会で2016年3月に承認され2016年6月に刊行された、航空飛行中に受ける宇宙放射線からの防護についての報告書

Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation.
(Publication 132. *Annals of the ICRP*, Vol.45, No.1 (2016))

をICRPの承諾のもとに翻訳したものである。

本書の翻訳は、広島大学原爆放射線医科学研究所の保田浩志氏によって行われた。この訳稿をもとに、ICRP刊行物翻訳委員会において推敲を重ねるとともに、ICRP第4専門委員会の甲斐倫明氏の監修をいただいて、最終稿を決定した。原文の記述への疑問は原著関係者に直接確認して訂正し、また原文の意味を正しく伝えるために必要と思われる場合は、多少の加筆や修正、訳注を付した。

ICRPは、歴史的に人工的な放射線からの放射線防護に重点を置いて多くの勧告を出してきた。防護の対象が拡大し始めたのはICRPの1990年勧告からであろう。1990年勧告では、量や起源にかかわらずいかなる放射線からの被ばくに対しても放射線防護を図るためのシステムが提案された。その流れは、2007年勧告において計画被ばく、緊急時被ばく、現存被ばくという3つの状況別に放射線防護を考えることに繋がっている。現存被ばく状況とは、結果として生じる被ばくを管理する決定が行われる時点においてすでに存在する線源に起因する被ばく状況であり、大地や宇宙などの自然界にもともと存在する線源からの被ばくや原発事故後の安定期における汚染核種からの被ばくなどがその例である(Publication 82「長期放射線被ばく状況における公衆の防護」)。ICRPは、現存被ばく状況での放射線防護の勧告を系統的に出し始めており、本書は高高度を移動する際に宇宙線からの被ばくを特に多く受ける人々(航空機乗務員や高頻度旅客)を対象とした勧告となっている。この他、現存被ばく状況での放射線防護に関しては、Publication 111「原子力事故又は放射線緊急事態後における長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用」(既刊)や同Publication 126「(仮)ラドン被ばくに対する放射線防護」(現在翻訳中)などがある。興味のある方は、これらの文書にもアクセスしていただきたい。

当翻訳事業の成果は、すべて ICRP のウェブサイトにて PDF 版にて公開される。この翻訳が、我が国の放射線防護に資することを、完成までの過程に携わったすべての方々とともに心より願うものである。

2019（平成 31）年 3 月

ICRP 刊行物翻訳委員会

委員長 鈴木 元

原子力規制庁
国内規制に係る国際放射線防護委員会刊行物の調査事業
ICRP 刊行物翻訳委員会

- 委員長 丹羽 太貫¹⁾ (前 ICRP 主委員会, (公財)放射線影響研究所)*
鈴木 元 (国際医療福祉大学クリニック)**
- 副委員長 今村 恵子¹⁾ (元 聖マリアンナ医科大学)*
佐々木道也 ((一財)電力中央研究所)**
- 委員 大野 和子³⁾ (京都医療科学大学)
小田 啓二²⁾ (神戸大学)
川口 勇生 ((国)量子科学技術研究開発機構)
木内 伸幸²⁾ ((国)日本原子力研究開発機構)
佐々木康人 (湘南鎌倉総合病院附属臨床研究センター)
保田 浩志²⁾ (広島大学原爆放射線医科学研究所)
吉澤 道夫¹⁾ ((国)日本原子力研究開発機構)

監 修 者

- 甲斐 倫明 (ICRP 主委員会, 大分県立看護科学大学)
丹羽 太貫²⁾ (前 ICRP 主委員会, (公財)放射線影響研究所)
小笹晃太郎 (ICRP 第 1 専門委員会, (公財)放射線影響研究所)
酒井 一夫 (ICRP 第 1 専門委員会, 東京医療保健大学)
佐藤 達彦 (ICRP 第 2 専門委員会, (国)日本原子力研究開発機構)
細野 眞 (ICRP 第 3 専門委員会, 近畿大学)
米倉 義晴 (前 ICRP 第 3 専門委員会, (公社)日本アイソトープ協会)
本間 俊充 (ICRP 第 4 専門委員会, 原子力規制庁)
齋藤 則生 (ICRU 委員, (国)産業技術総合研究所)

¹⁾2018 年 3 月まで, ²⁾2018 年 6 月から, ³⁾2018 年 10 月から

*2017 年 6 月～2018 年 3 月, **2018 年 6 月から

抄 録

本刊行物において、国際放射線防護委員会（ICRP）は、現行のICRPの放射線防護体系、航空飛行時の被ばくに関する最新の利用可能データ、そして航空飛行時の被ばくの管理において世界中で得られた経験を考慮に入れて、航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護に関する改訂ガイダンスを提示する。本刊行物では、宇宙放射線の起源、乗客と航空機乗務員はどのように宇宙放射線を浴びるのか、この現存被ばく状況に適用される基本的な放射線防護の原則、そして利用可能な防護対策について述べる。最適化の原則の履行については、委員会は、個人が受けるかもしれない被ばくのレベルに釣り合ったグレード別アプローチを勧告する。目標は、最も被ばくする個人の被ばくを合理的なレベルに保つことである。委員会はまた、宇宙放射線に対する意識を高めるとともに、関係するステークホルダーによる情報に基づく決定を支援するために、関連情報を広く発信するよう勧告する。

キーワード：宇宙放射線，航空飛行，航空機乗務員，高頻度旅客，グレード別アプローチ

目 次

	頁	(項)
抄 録	v	
論 説	ix	
序 文	xiii	
要 点	xv	
用語解説	xvii	
1. 緒 言	1	(1)
1.1 背 景	1	(4)
1.2 範 囲	2	(8)
1.3 本刊行物の構成	2	(9)
2. 航空飛行時の宇宙放射線被ばくの特徴	3	(10)
2.1 歴史的背景	3	(10)
2.2 線源と経路	4	(14)
2.3 太陽フレア	6	(19)
2.4 航空機における個人被ばくの評価	8	(22)
2.5 航空機乗務員の被ばく	9	(27)
2.6 航空機乗務員の疫学的調査	11	(31)
3. 乗客と航空機乗務員に対する ICRP の防護体系	13	(36)
3.1 被ばく状況のタイプと被ばくのカテゴリー	13	(38)
3.1.1 被ばく状況のタイプ	13	(38)
3.1.2 被ばくのカテゴリー	14	(42)
3.2 防護戦略の正当化	14	(44)
3.3 防護の最適化	15	(47)
3.3.1 参考レベル	15	(49)
3.3.2 最適化プロセス	16	(53)

4. ICRP の防護体系の履行	17	(55)
4.1 防護対策	17	(55)
4.2 グレード別アプローチ	18	(58)
4.2.1 低頻度旅客	18	(60)
4.2.2 私的な理由または職務のための高頻度旅客	18	(62)
4.2.3 航空機乗務員	19	(65)
4.2.4 要 約	20	(70)
4.3 胚／胎児の防護	20	(71)
4.4 公衆への情報発信とステークホルダーの関与	21	(74)
5. 結 論	23	(80)
参 考 文 献	25	
付属書 A いくつかの航空路に関する宇宙放射線被ばく	27	

論 説

宇宙放射線の海における飛行

電離放射線は、自然界に遍く存在する。トリウム、ウランおよびカリウム——地球が形成されるはるか以前に太陽の中心において生み出された、生まれながらに放射性的の元素——ならびにそれらの壊変生成物は、地球上に生命が誕生する以前から存在したし、今後数十億年にわたってなお存在することになる。それらは、さまざまな度合いで岩石中、土壤中、水中、空气中、植物中、動物中および人間の体内に見出される。地球からの放射線に加えて、我々は、宇宙生成時の混沌の中で、また恒星にエネルギーを供給する大質量のプロセスによって生成される、太陽および太陽系外からの宇宙放射線にもさらされる。この「放射線の海」の中で進化した地球上の生命、そして将来世代も、我々が現在生きているようにその中で生きることになる。

電離放射線は直接感知することができず、その存在が明らかとなったのは、Wilhelm Röntgen による 1895 年の X 線発見 (Röntgen, 1895) からである。翌年、Henri Becquerel は、放射線が自然環境の一部として在ることを発見した (Becquerel, 1896a, b)。その 16 年後、Victor Hess による高高度気球飛行を用いた実験によって、宇宙放射線が発見された (Hess, 1912)。

何十年にもわたって、放射線防護は、X 線のような人間によって製造または濃縮された放射線源、ならびに、原子炉および加速器において創られた放射性同位元素を対象とした。しかし、ここ数十年間、ある種の自然線源、特にラドンが一層の注目を集め始めた。ラドンによる被ばくは、自然放射線による世界の平均線量の半分に相当する (UNSCEAR, 2010)。国際放射線防護委員会 (ICRP) は、最近 *Publication 126* (ICRP, 2014) の中で、ラドン被ばくと関連する放射線防護を扱った。

日常の宇宙放射線被ばくもまた、我々が生きる環境のありのままの一部である。これについては、数十年前まで、地球の磁場と大気が宇宙放射線からの防護をもたらすので、あまり関係のないものとみなされていた。しかし今や、500 人を上回る宇宙飛行士がこの防護された環境を超え、著しく高い宇宙放射線線量率に直面しており、この数は今後増加することになる。この特別な状況は、“Assessment of radiation exposure of astronauts in space” (宇宙における宇宙飛行士の放射線被ばく評価) と題された *Publication 123* (ICRP, 2013) の中で扱われた。

さらに、今日では、民間航空機による旅行の増加を背景に、宇宙放射線被ばくは航空機乗務

員および乗客にとっても重要である。高所を移動する際、我々は地上よりも高いレベルの宇宙放射線にさらされる。典型的な民間飛行高度では、線量率は、主として緯度、高度および太陽活動のレベルによるが、一般に1時間あたり2～10 μ Svの範囲である（ICRU, 2010）。この年線量は、自然放射線に起因する他の被ばくによる年線量、世界平均として2400 μ Svかつその典型的な範囲として1000～13,000 μ Sv（UNSCEAR, 2010）と比較して有意となるには、年に何百時間もの飛行を要する。よって、本刊行物では、毎年何百時間を上空で過ごす人もいる航空機乗務員と高頻度旅客（frequent flyer）を対象とする。

大気中の宇宙放射線は、複雑な粒子組成およびエネルギーを持つ一次放射線場と二次放射線場の両者を含む。こうした放射線場の全スペクトルをモニタリングできる測定器は概してかさばって扱いにくく、あまり堅牢ではないので、航空機乗務員と乗客に対する線量を測定するのは難しい。それゆえ、過去20年にわたる研究においては、ソフトウェアプログラムコード（以下、コード）に基づく線量評価が主に行われてきた。上空の放射線場は比較的一定であり、局所的に線量の変化が生じるのはまれで、太陽によって引き起こされるグラウンドレベルエンハンスメント（ground-level enhancement [GLE], *訳注 太陽フレアの影響による地上の線量増大）で起こるぐらいなので、コードの利用は可能である。これらのコードは、通常飛行計画として提示される、航空路に沿った緯度、経度および気圧高度の情報を使用する。

国際的には、航空機乗務員と乗客に対する線量を測定データの中央値の±20%以内の誤差で計算できると検査・確認されたコードやモデルは11を上回る数にのぼる。これらのコードは通常保守的な推定値をもたらすものなので、この精度は科学界において受け入れられるものとみなされている。

1996年以来、EU（欧州連合）では、航空機乗務員は8～12 kmの典型的な飛行高度において職業被ばくを受ける作業者と認識されてきた。こうした背景のもと、欧州の航空会社はすべて、航空機乗務員の被ばくの記録を保存するよう要求されている。2006年以降は、EURATOM/96/29（EURATOM, 2006）によって法令として遵守が命じられ、すべての加盟国で履行されている。同様に、1990年代に、カナダは*Publication 60*（ICRP, 1991）における勧告を採用して航空機乗務員の放射線モニタリングを行うことを求め、これはPCAIREプログラムの開発につながった。2006年に、日本の放射線審議会が航空機乗務員に対する線量のモニタリングおよび管理に関するガイドラインを策定するとともに、関連する記録の保存を自発的に行うよう、国の代表的航空会社および国内航空会社に強く促した。

米国は、放射線被ばくに関する教材ならびに連邦航空局の民間航空医学研究所によって設定・勧告されている限度を通じて、航空機乗務員の放射線安全を促進している。同研究所は、先述したのと同じ飛行計画パラメータを用いるコンピュータプログラムを作成しており、自主的なモニタリングならびに個人的な被ばく線量評価および勤務体制に関するガイダンスを奨励して

いるが、航空会社による正式なモニタリングプログラムは義務づけていない。

これらのコードを使えば、線量評価を比較的簡単に行うことができ、これは放射線防護における重要なステップとなる。その後のステップは、防護オプションの検討、さらに容認できない被ばくおよび線量分布がもたらす不公平さを回避するための個人線量の判断基準を用いた防護の最適化を必要とする。

Publication 103 (ICRP, 2007) の中で、委員会は、計画、現存および緊急時という3つの被ばく状況を導入した。これらの状況は、被ばくのカテゴリー（公衆、職業および医療）とともに、いかなる特定の状況においても最も適切な放射線防護のアプローチを明確に示すのに役立つ。

本刊行物は、防護に関する決定を行いうる前に線源が存在するという理由で、宇宙放射線被ばくは現存被ばく状況であることを確認する。さらに、本刊行物では、航空機乗務員の宇宙放射線被ばくは職業被ばくであり、そのため、たとえオプションが限られるケースであるとしても、雇用主は防護において果たすべき役割があることを明言する。この点にいかなる矛盾もない。職業被ばくは現存被ばく状況においても生じうるが、これは防護措置が予め計画できないことを意味するものではない。

個人線量の制限を伴う一般的な防護の最適化のアプローチは、あらゆる状況に適用される。被ばくのカテゴリーと被ばく状況のタイプは、最適化を達成する方法に影響を及ぼすことになる。さらに、特定の状況によっては、どの措置が实际的であり、有効であり、選択に値するのかに影響する。本刊行物は、航空飛行時の宇宙放射線に固有の放射線防護に関する勧告を提示するものである。

IAN GETLEY

ICRP 事務局長、編集主幹

CHRISTOPHER CLEMENT

参考文献

- Becquerel, H., 1896a. Sur les radiations émises par phosphorescence. *Comptes Rendus* **122**, 420–421.
 Becquerel, H., 1896b. Sur les radiations émises par phosphorescence. *Comptes Rendus* **122**, 501–503.
 EURATOM, 2006. Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 Laying Down Basic Safety Standards for the Protection of the Health of Workers and the General Public Against the Dangers Arising from Ionizing Radiation. *Off. J. Eur. Commun.* No **L 159**/1. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01996L0029-20000513&from=EN> (last accessed 14 May 2016).
 Hess, V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift* **13**, 1084–1091.

- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* **21**(1–3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2–4).
- ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. *Ann. ICRP* **42**(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. *Ann. ICRP* **43**(3).
- ICRU, 2010. Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. Report 84. *J. ICRU* **10**(2).
- Röntgen, W., 1895. Über eine neue Art von Strahlen. *Sitzungsberichte der Würzburger Physik-med. Gesellschaft* **22**, 153–157.
- UNSCEAR, 2010. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York.

序 文

Spirit of St. Louis 号がロングアイランドから 5800 km 飛んでル・ブルジェ空港に着陸した後、その飛行士 Charles Lindbergh の第一声は、「さあ、やったぞ！」であった (The New York Times, 1924)。当時の観客たちは、寒さ、天候条件、そして疲れに対するこの先駆者の勇気に注目したが、放射線被ばくについて語った者は誰もおらず、それには十分な理由があった。当時、宇宙放射線のことを承知していたのは一握りの科学者に過ぎなかったのである。この先駆的な偉業は、大陸横断飛行への道を切り開いた。Charles Lindbergh の飛行以後、航空機の性能および収容力の向上、格安航空会社、そして旅行業の拡大によって、航空旅客数が大幅に増加した。2014 年には約 32 億枚の航空券が販売されており、この数字は 2030 年までに倍増することが予想されている (ICAO, 2015)。さらに、ビジネスジェット市場は年に約 4% 成長し続けており、航空機は 2032 年までに倍増することが見込まれている。これにより、航空機乗務員および乗客の宇宙放射線による個人と集団の被ばく量が顕著に増える可能性が大きい。

これとの関連で、2010 年 10 月に南アフリカのケープタウンで開かれた会合において、国際放射線防護委員会 (ICRP) の主委員会は、航空飛行時の宇宙放射線被ばくに対する放射線防護に関するガイダンスを作成するために、第 4 専門委員会直属のタスクグループ 83 の設置を承認した。

タスクグループ 83 への付託事項は、宇宙放射線被ばくに対する航空機乗務員および乗客、特に高頻度旅客の防護のための 2007 年勧告 (ICRP, 2007) の適用について記述し明確化する報告書を作成することであった。この報告書では、航空飛行時の被ばくの管理と関連する被ばく状況のタイプならびに履行されるべき適切な放射線防護原則について論じられている。特に、委員会によって勧告された放射線防護体系の基礎である最適化の原則の履行に注意が払われている。

タスクグループ 83 のメンバーは以下のとおり：

J. Lochard (議長)	J-F. Bottollier-Depois	W. Rühm
D.T. Bartlett	R. Hunter	H. Yasuda

通信メンバーは以下のとおり：

S. Mundigl

要 点

- 宇宙放射線は、宇宙と太陽に由来する高エネルギー粒子からなる。基本的に、高度と緯度が高いほど線量率は高くなる。線量率の急増は、太陽フレアとの関連で起こりうる。結果として、航空機による飛行は宇宙放射線被ばくを増大させる。
- 乗客の数は増加し続けること、航空機技術は航空機がより長時間より高い高度で飛行するのを可能にすることを考えると、航空機乗務員と乗客の宇宙放射線への累積被ばくは増大すると思われる。したがって、委員会は、防護の戦略を策定し履行するのが重要であると考えている。
- 委員会は、太陽フレアによって引き起こされるものを含めて、宇宙放射線被ばくを現存被ばく状況とみなしている。
- 委員会は引き続き、航空機のあらゆる乗客、すなわち、低頻度旅客と私的な理由または職務に因る高頻度旅客のいずれの被ばくも公衆被ばくとみなされるべきであり、航空機乗務員の被ばくは職業被ばくとして扱われるべきであると考えている。
- 委員会は、特定の事情において特別な注意を要するような最も高い被ばくをする個人の被ばくレベルを考慮に入れて選択された線量参考レベルを、典型的には1年あたり5～10mSvの範囲で設け、被ばくが合理的に達成可能な限り低く保たれるよう勧告する。
- 防護戦略の現実的な履行にあたり、委員会は、個人の飛行頻度に基づくグレード別アプローチを勧告する。
 - ▷ 航空機のほとんどの乗客は低頻度旅客であり、その宇宙放射線被ばくは放射線被ばくの総量との関係で見れば取るに足らない量とみなされる。しかしながら、委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報をあらゆる乗客が入手できるように勧告する。
 - ▷ 私的な理由または職務のための高頻度旅客の場合、一般的事項の情報を提供すべきという勧告に加えて、委員会は、その必要を感じた場合に個人が飛行頻度の調整を考えることを可能にするために、線量の自主的評価を奨励する。
 - ▷ 被ばくが航空機乗務員に匹敵する、職務によるごく一部の高頻度旅客のために、委員会は、そのような航空機利用客に関する要件が、支配的な状況に応じて、当該個人とその組織の間の対話によってケースバイケースで決定されるよう勧告する。
 - ▷ 航空機乗務員の場合、委員会は、業務管理者が以下のようにするよう勧告する。
 - (i) 教育プログラムを通じて、宇宙放射線について航空機乗務員に個人的に知らせる。

- (ii) 航空機乗務員の線量を評価する。
 - (iii) 航空機乗務員の年間線量と累積線量*を記録する。これらのデータは当該個人が入手できるようにするべきであり、少なくとも当該個人の平均余命に匹敵する合理的な期間にわたって保存されるべきである。
 - (iv) しかるべき場合には、選択された線量参考レベルを考慮し、当該航空機乗務員との協議を経て、飛行勤務表を調整する。
- ほとんどの目的では、航空機乗務員と乗客に対する線量の評価には、適切に検証された計算プログラムの1つを用いれば十分であるとみなされる。
 - 私的な理由または職務のための高頻度旅客のうち、妊娠している乗客は、被ばくの自主的評価に基づいて、胚／胎児の宇宙放射線被ばくを低減するために飛行頻度を調整することを望むかもしれない。航空会社の管理者は、妊娠した航空機乗務員のために、委員会の勧告と整合するよう、妊娠の届け出後の残りの期間における職務を調整するための対策を用意すべきである。
 - 委員会はまた、国の当局または航空会社が、宇宙放射線に対する意識を高め、関係するあらゆるステークホルダーによる情報に基づく決定を支援するために関連情報を広く発信するとともに、職業被ばくを受ける個人のための放射線防護文化を育むよう勧告する。

*訳注 原文は individual and cumulative dose。ICRP に確認の結果、修正。

用語解説¹⁾

見出し語は五十音順で配列。⇔は参照先を示す。
原著の配列順による見出し語訳は本項末尾を参照。

GLE [Ground-level enhancement]

太陽フレアが、地表の放射線レベルを中性子モニタによって容易に検出される程度まで増大させるのに十分なエネルギーと強度の宇宙線を放出する場合、この現象を「GLE (ground-level enhancement or event)」と呼ぶ。

宇宙放射線 [Cosmic radiation]

宇宙放射線は、地球大気圏外に由来する主として原子核である高エネルギー粒子と、大気およびその他の物質との相互作用によって生じる粒子からなる電離放射線である。

一次宇宙放射線は、宇宙および太陽から地球の軌道に入射する宇宙放射線である。

二次宇宙放射線は、大気またはその他の物質と相互作用する一次宇宙放射線によって直接もしくは連鎖的な反応において生み出される粒子からなる。航空機における放射線防護および放射線測定の見点で重要な粒子は、中性子、陽子、光子、電子、陽電子、ミュー粒子ならびに、比較的量は少ないが、パイ中間子および陽子よりも重い原子核である。

銀河宇宙放射線は、太陽系外に由来する宇宙放射線である。

太陽宇宙放射線は、太陽からの宇宙放射線である。

業務管理者 [Operating management]

組織の最高レベルにあって組織の指揮、管理および評価を行う人またはそのグループ。最高経営責任者、社長、業務執行役員や執行グループなど、異なる表現も多く用いられる。

緊急時被ばく状況 [Emergency exposure situation]

緊急時被ばく状況は、計画された線源の制御の喪失もしくは、制御されていない線源に係するあらゆる予想外の事象（たとえば、悪意のある事象）の結果として生じる被ばく状況である。これらの状況は、被ばくを回避または軽減するために至急かつ適時の対策を必要とする。

1) 本刊行物の発行時点において、委員会は、いくつかの不完全と不整合のために、*Publication 103* (ICRP, 2007) に含まれている用語解説を改訂中であった。本刊行物では、定義は *Publication 103* の用語解説よりもむしろ本文に見出されるものを参照していることに注意されたい。

グレード別アプローチ [Graded approach]

グレード別アプローチは、ある個人グループについて立案された委員会の勧告または要件が、支配的状況も考慮して、それら個人の被ばくのレベルに釣り合ったものであることを確実にすることを目的とする。

計画被ばく状況 [Planned exposure situation]

計画被ばく状況は、放射線源の計画的な導入と運用の結果として生じる被ばく状況である。計画被ばく状況は、予期すること、および完全に管理することが可能である。

現存被ばく状況 [Existing exposure situation]

現存被ばく状況は、結果として生じる被ばくを管理する決定が行われる時点においてすでに存在する線源に起因する被ばく状況である。これらの線源には、自然線源（宇宙放射線、ラドンおよびその他の自然起源の放射性物質）および人工線源（過去の行為、事故または放射線事象による長期被ばく）が含まれる。被ばくの特徴づけは、それらの管理の前提条件である。

高頻度旅客 [Frequent flyer]

私的な理由または職務のために頻繁に航空機で旅行し、フリークエントフライヤープログラムに登録されているかもしれない人。高頻度旅客の中には、一般的な航空機乗務員と同程度の年間飛行時間（たとえば、1年あたり500時間）に達する人もいるかもしれない。

雇用主 [Employer]

相互に合意した関係により、作業者の雇用においてその作業者に対して認知された責任、関与および義務を負う、国の法律に従って指定された組織、法人、共同企業体、企業、協会、信託機構、不動産業者、公共または民間機関、グループ、政治団体または行政団体もしくはその他の人。

参考レベル [Reference level]

緊急時被ばく状況および現存被ばく状況において、この線量の判断基準は、これより上では被ばくの発生を許した計画は不適切であると判断され、これより下では防護の最適化が履行されるべきであると判断される、線量またはリスクのレベルを表す。参考レベルとして選択される値は、考慮されている被ばくの支配的状況に左右されることになる。

職業被ばく [Occupational exposure]

職業被ばくは、作業者が自らの業務の結果として受けるあらゆる被ばくをいう。しかし、放射線はどこにでも存在するゆえに、委員会は「職業被ばく」の使用を、業務管理者の責任であると合理的にみなされうる状況の結果として業務上受ける放射線被ばくに限定している。

知る権利 [Right to know]

自律、公正および慎重という倫理的価値観と整合するように、患者、作業者および公衆の構成員は、自身はいかなるハザード（注、危険性あるいは有害性を与えるもの）にさらされており自身をどのように防護すべきなのかについて知らされる権利を有するという原則。

正当化 [Justification]

(i)放射線に関して計画された活動が、総合的に見て有益であるのかどうか（すなわち、その活動の導入または継続による個人および社会の便益は、その活動の結果として生じる害にまさるのかどうか）、もしくは(ii)緊急時被ばく状況または現存被ばく状況において被ばくを管理する決定は、総合的に見て有益であると見込めるのかどうか（すなわち、個人および社会の便益は、そのコストおよびそれが引き起こすいかなる害または損害にもまさるのかどうか）を決定するプロセス。

線量の判断基準（線量規準） [Dose criteria]

不公平さに対処するために、また十分な防護を確保するために、防護の最適化のための境界を提示する目的で放射線防護プログラムの一環として定められる個人線量のあらゆる判断基準（規準）の総称。委員会の用語である「参考レベル」、**「線量拘束値」**および**「線量限度」**はすべて、特定の状況における線量の判断基準の例である。

胎児 [Fetus]

子宮内で完全に発育した、まだ生まれていないヒト（妊娠3か月より後）。

太陽風 [Solar wind]

太陽風は、高温になって太陽コロナから離れ、太陽の磁場によって1秒あたり400 kmの平均速度で太陽から放射状に伝搬する、電子、陽子およびアルファ粒子のプラズマである。太陽風は、銀河宇宙放射線のフルエンスに影響を及ぼす、比較的強力で入り組んだ磁場を伝搬する。太陽風は、北極地方のオーロラ（北極光）や南極地方のオーロラ（南極光）を引き起こす。

太陽フレア [Solar flare]

太陽フレアは、太陽から宇宙空間へ高エネルギー太陽粒子が大規模に放出される現象である。発生頻度は太陽活動に伴って変化し、週に1回未満～日に数回である。大規模太陽フレアは、小規模太陽フレアよりも低頻度である。太陽フレアは、「太陽粒子現象」として知られる、太陽風に乗った高エネルギー粒子の流れを生じさせる。これらの粒子が地上の宇宙放射線検出器によって観測される場合、「GLE (ground-level enhancement or event)」と呼ばれる。

低頻度旅客 [Occasional flyer]

たまに航空機で旅行し、年間飛行時間が一般的な航空機乗務員より明確に下回る人。

胚 [Embryo]

子宮内発育の初期段階にある、まだ生まれていないヒト（妊娠3か月より前）。

被ばく経路 [Exposure pathway]

放射線または放射性核種が人に到達し被ばくを引き起こす経路。

被ばく状況 [Exposure situation]

自然または人工の放射線源がさまざまな経路を通じて運ばれ、その放射線が人または他の生物相の被ばくにつながる状況。

被ばくのカテゴリー [Categories of exposure]

委員会は3つの放射線被ばくのカテゴリー、すなわち、職業被ばく、公衆被ばくおよび医療被ばくを区別している。

フルエンス [Fluence]

フルエンスは、ある球に入射する粒子の数をその断面積で割った商である。フルエンスは m^{-2} の単位で測定される。

防護原則 [Principles of protection]

放射線防護体系を構成する3つの基本原則。すなわち、制御可能なあらゆる被ばく状況に適用される正当化の原則および防護の最適化の原則、ならびに、計画被ばく状況にのみ適用される線量限度の適用の原則である。

防護対策 [Protective action]

人を電離放射線の害から防護するために定められる対策。防護対策は一般に、線源までの距離、被ばくの時間、もしくは遮蔽に影響を及ぼす対策である。

防護の最適化 [Optimisation of protection]

放射線防護の最適化の原則は、経済的および社会的要因を考慮に入れて、個人線量の大きさ、被ばくする人の数および潜在被ばくの可能性を合理的に達成可能な限り、適切な線量の判断基準（拘束値または参考レベル）よりも低く保つことを目的とする線源関連のプロセスである。

リスク [Risk]

リスクは、結果（例えば、がん）が生じることになる確率に関係する。本報告書では、リスクに関する用語は以下のようにまとめられる。

過剰相対リスクは、被ばく集団における疾病率を非被ばく集団における疾病率で除して1を減じたものである。これは、Svあたりの過剰相対リスクとして表現されることが多い。

相対リスクは、被ばく集団における疾病率を非被ばく集団における疾病率で除したものである。

用語解説の見出し語

〈原著配列順〉

Categories of exposure 被ばくのカテゴリー	Graded approach グレード別アプローチ
Cosmic radiation 宇宙放射線	Justification 正当化
Dose criteria 線量の判断基準（線量規準）	Occasional flyer 低頻度旅客
Embryo 胚	Occupational exposure 職業被ばく
Emergency exposure situation 緊急時被ばく状況	Operating management 業務管理者
Employer 雇用主	Optimisation of protection 防護の最適化
Existing exposure situation 現存被ばく状況	Planned exposure situation 計画被ばく状況
Exposure situation 被ばく状況	Principles of protection 防護原則
Exposure pathway 被ばく経路	Protective action 防護対策
Fetus 胎児	Reference level 参考レベル
Fluence フルエンス	Right to know 知る権利
Frequent flyer 高頻度旅客	Risk リスク
GLE (Ground-level enhancement) GLE	Solar flare 太陽フレア
	Solar wind 太陽風

1. 緒 言

(1) 航空機で座席にたどりつくまでは、時には長い行程となる。チェックインとパスポート検査の後、空港のセキュリティ検査を受けなければならないが、このプロセスにおいて、放射線がある役割を果たすことがある。機内持ち込み手荷物を検査するために、また場合によっては人を検査するために、放射線が用いられる場合である。委員会は最近、セキュリティ検査における放射線防護に関する勧告を発表している (ICRP, 2014)。

(2) 離陸後、航空機が巡航高度へと上昇するのに従って、宇宙放射線被ばくは増加する。典型的な巡航高度 (> 10,000m) においては、線量率は1時間あたり $7\mu\text{Sv}$ (海拔ゼロ地点における宇宙放射線被ばくレベルの150倍超) に達する。より高い高度でより長い時間にわたって飛行する新しい超長距離ジェットの将来的な利用は、現在の飛行と比較して総線量を30～50%増加させると推定されている [ドイツの乗務員組合 (*Vereinigung Cockpit*) による推定であり, Frasch et al. (2011) によって引用された]。

(3) 委員会は以前に、妊娠した航空機乗務員に特に注意を払いながら、航空機乗務員の放射線防護を特に焦点とする一連の勧告を作成した (ICRP, 1984, 1991)。本刊行物では、これらの勧告をレビューするとともに、乗客、特に私的な理由または職務のために旅行する高頻度旅客の被ばくも考慮することになる。

1.1 背 景

(4) 委員会は、*Publication 9* (ICRP, 1965) の中で、高高度で飛行する結果として生じる被ばくに初めて言及した。*Publication 26* (ICRP, 1977) の88項では、委員会は、「高高度飛行」は自然放射線被ばくを増加させる可能性があることに言及した。*Publication 39* (ICRP, 1984) の10項では、「現状のとおり飛行すること」*が現存被ばく状況の一例として示された。

*訳注 同書の表3における項目のひとつ。くわしくは同表を参照 (邦訳版あり)。

(5) 委員会は、宇宙放射線被ばくに対する防護に関する最初の勧告を *Publication 60* (ICRP, 1991) の中で発表した。委員会は、民間ジェット機の運航に関与する人員は職業被ばくを受けるとして扱われるよう勧告した。飛行時間が限られているゆえに線量はあらかじめ定められた値を超えないと思われるため、個人モニタリングのための線量計の使用は必要ではないとみなされた。委員会はさらに、他の乗客よりも頻繁に飛行する高頻度旅客や添乗員などのグループにも注意が払われるべきであると指摘した。他の乗客の防護に関する言及はしなかった。

(6) 委員会はその後、*Publication 75* (ICRP, 1997) の中で勧告を明確化し、ビジネス旅客は(1時間あたり約5~6 μ Svで約200時間の飛行を考えて)1mSv程度の年実効線量を受けるに過ぎないと思われるため、より高いレベルの宇宙放射線に職業被ばくするグループは航空機乗務員のみであると委員会は考える、と指摘した。委員会はまた、航空機内で指定区域の使用を考慮する必要はないこと、航空機乗務員の年実効線量は飛行時間と対応する航空路における典型的な実効線量率から導き出されること、そして被ばくの制御は主に飛行時間の制限と航空路選択によって確保されることを繰り返して述べた。最近になって、国際放射線単位測定委員会(ICRU)とICRPによる共同刊行物は、航空機の高度における宇宙放射線場について述べるとともに、航空会社およびその規制機関による航空機乗務員の線量評価の国際的な斉一性を容易にするために、航空機乗務員に対する宇宙放射線による線量の妥当性確認のための参考データを提供した(ICRU, 2010)。

(7) 本刊行物は、航空飛行時の宇宙放射線からの放射線防護に関連するこれまでの委員会勧告に取って代わるものである。

1.2 範 囲

(8) 委員会は最近、宇宙における宇宙放射線被ばくの管理に関する勧告を *Publication 123* (ICRP, 2013) として発表している。本刊行物の目的は、航空飛行時の宇宙放射線被ばくの管理に関する委員会の勧告を更新し明確化することである。本刊行物は、*Publication 103* (ICRP, 2007) における航空機乗務員の防護に関する一般的な勧告の発展を考慮に入れている。本刊行物は、乗客、特に私的な理由または職務のための高頻度旅客の被ばくを考慮することによって、考察の範囲を航空機乗務員以外へと拡大することが意図されている。本刊行物では、妊娠した女性の被ばくについてもトピックとして扱う。

1.3 本刊行物の構成

(9) 2章では、宇宙放射線による航空飛行時の被ばくの特徴を提示する。同章では、線源および被ばく経路の簡潔な説明ならびに、太陽フレア、被ばくレベルの定期的評価、そして個人および集団線量データの概要を示す。3章では、被ばく状況のタイプ、関係する被ばくのカテゴリーならびに適用されるべき基本原則を含めて、航空飛行時の宇宙放射線被ばくに対するICRPの放射線防護体系について述べる。4章では、被ばくするさまざまな個人、すなわち低頻度旅客(occasional flyers)、高頻度旅客(frequent flyers)および航空機乗務員についてグレード別アプローチを用いた、ICRP放射線防護体系の履行に関するガイダンスを示す。4.3節では、妊娠した乗客と航空機乗務員の被ばくという特殊な状況を扱う。

2. 航空飛行時の宇宙放射線被ばくの特徴

2.1 歴史的背景

(10) 1859年9月、英国のアマチュア天文学者である R.C. Carrington は、地球に向かって移動する、大きな質量放出を伴う太陽フレアを観測した。欧州と米国のいたるところですぐに電信システムは故障し、カリブ海まで南方の空をオーロラが満たした。今日では、1859年のこの事象のような太陽粒子またはプロトン現象（SPE）は、磁気嵐を引き起こしうる比較的高エネルギーの粒子を放出することが知られている。

(11) 1912年、V. Hess は、3個の電離箱とともに5300mの高度まで、歴史に残る気球飛行を行った。Hess は、上昇するのに従って放射線のレベルが高くなることを発見し、これは電離放射線が原因であると考えた。放射線は最高高度では、地上と比較して4倍高かった。Hess は、気球上昇を夜間に数回、皆既食の間に1回行うことによって、太陽が放射線源である可能性を排除した。Hess は、「私の観測結果は、透過力が極めて大きい放射線が上方から我々の大気に入るという仮定によって最もよく説明される」と結論づけた（Hess, 1912）。

(12) 1925年、R.A. Millikan は、これらの放射線の起源が地球大気圏外にあることを証明するとともに、「宇宙線」および「宇宙放射線」という用語を導入した。同年、A. Compton は、宇宙放射線は主として荷電粒子であると提唱した。

(13) 民間の超音速航空機が開発されたのは1960年代である。すなわち、ツポレフ144プロトタイプの初飛行は1968年であり、コンコルドプロトタイプの初飛行は1969年だった。超音速航空機が巡航する高高度（約19,000m）は、航空機乗務員と乗客の宇宙放射線被ばくに関する懸念を増大させた。線量のモニタリングを確保するために、一部の航空機乗務員は個人線量計を携行し、コンコルドには放射線量計が取り付けられた。ツポレフ144の乗務員用には、特別な線量計も開発された。放射線レベルの増大が著しい場合（たとえば、ツポレフ144では1時間あたり $300\mu\text{Sv}$ ）、航空機はより低い高度へと下降することがよくあった。これは、航空機における宇宙放射線被ばくの日常モニタリングの端緒を開いた。今日では、航空飛行時の宇宙放射線による線量は、モニタリング結果によって検証されているコンピュータコードを用いて一般に推定されている。

GCRを偏向させる。太陽風は11年の太陽活動周期とともに変化し、磁場の変動を引き起こす。地球の軌道付近では、GCRは太陽活動極小期に最大であり、太陽活動がより大きく、太陽黒点、フレアおよびコロナ質量放出を伴う時に、GCRは強力な太陽風のために最小になる(図2.2)。

(17) 宇宙放射線粒子の経路は地球の磁場を横切るために曲げられ、これが荷電粒子に対する遮蔽の一部として作用する。地球の磁場が地表とほぼ平行である赤道付近では、高度が低

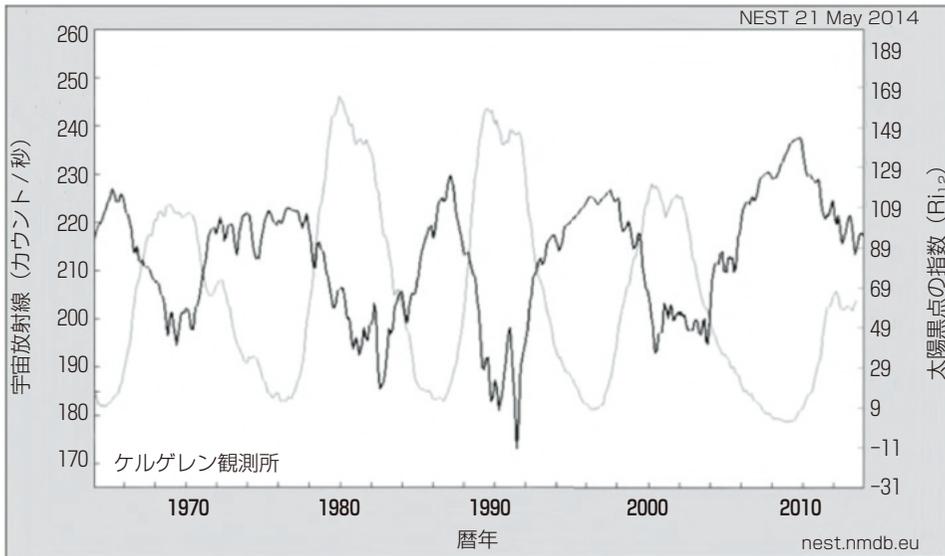


図2.2 1964～2014年における、太陽の活動(月間平滑太陽黒点数として表記;灰色の曲線)と宇宙放射線被ばく(ケルゲレン観測所で測定された月間平均中性子計数率として表記;黒色の曲線)の間の反相関(IRSN, 2016)。

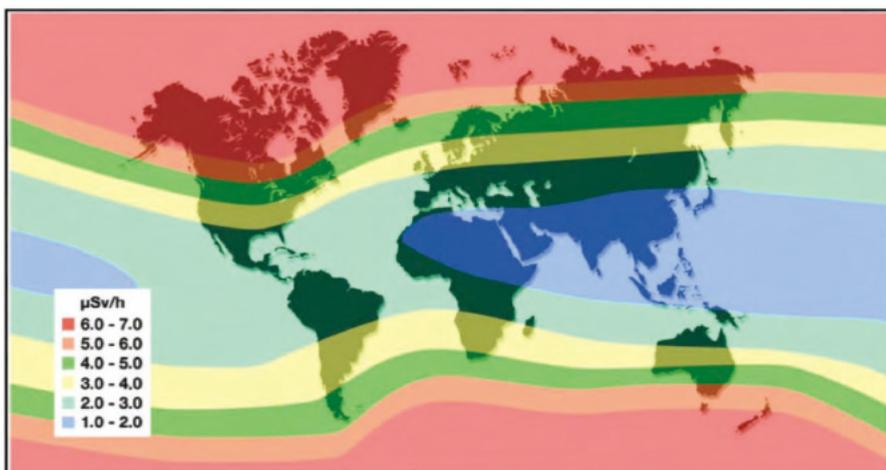


図2.3 地磁気による宇宙放射線の遮蔽: 2002年12月の高度11 kmにおける緯度別および経度別の周辺線量率。Frasch et al. (2011)より改変。

表 2.1 緯度別および周辺線量当量構成要素別の宇宙放射線への寄与
(高度 12,000m および太陽極小期における値) (EC, 2004)

粒子成分	赤道	極域
ミュー粒子	5 %	3 %
電子／陽電子	38 %	14 %
中性子*	37 %	64 %
陽子	12 %	14 %
光子	8 %	5 %

*線量の計算において用いられる中性子の放射線加重係数は、中性子エネルギーの連続関数として変化する (ICRP, 2007)。中性子エネルギー分布の範囲は $10^{-10} \sim 10^1 \text{ GeV}$ であり、 10^{-3} および 10^{-1} GeV において最大値を持つ (ICRU, 2010)。

いほど到達する粒子が少なくなり、磁気遮蔽効果が大きくなる。地球の磁場が地表とほぼ垂直である磁極付近では、最大数の一次宇宙放射線粒子が大気に到達し、航空飛行高度まで透過する二次宇宙放射線を生み出す。したがって、宇宙放射線被ばく率は、極圏でより高くなり、赤道付近でより低くなる (図 2.3)。

(18) 要約すると、航空機における宇宙放射線場は、高度、地磁気緯度および太陽活動周期によって変動する。通常の航空機の高度および赤道においては、電子／陽電子および中性子が線量の主たる構成要素であり、陽子がこれに続く。対照的に、より高い緯度においては、線量は主として中性子による (表 2.1)。さらに、より高い高度においては、陽子よりも重い原子核 (たとえば、アルファ粒子) の寄与が生じ始める。

2.3 太陽フレア

(19) 例外的に高いレベルの放射線は太陽フレアによって生じうるが、相当のエネルギーを持ち地上の中性子モニタによって観測できた事例はわずかに過ぎない (年に約 1 回)。これらは「GLE (ground-level enhancement or event)」と呼ばれる。GLE は、航空飛行高度における線量率の増大を引き起こしうる。図 2.4 は、1989 年 10 月に衛星によって観測された日々の陽子フルエンスを示したものであり、太陽フレアが容易に確認できる。

(20) 現在のところ、大きな不確実性を伴わずに SPE GLE の線量を予測することはほとんど不可能である (Desmaris, 2006)。SPE GLE の場合における高められた実効線量率に関する航空機乗務員に対する線量の計算は、地上の中性子モニタもしくは利用可能ならば機内測定の結果を用いて通常、遡及的に行われる。計算された線量率は相当大きなものになりうるが、EURADOS 作業グループ 11 によって得られた結果によれば、5 倍以上のファクターの大きな不確実性という特徴がある (EC, 2004; Beck et al., 2008)。Lantos and Fuller (2003) によれ

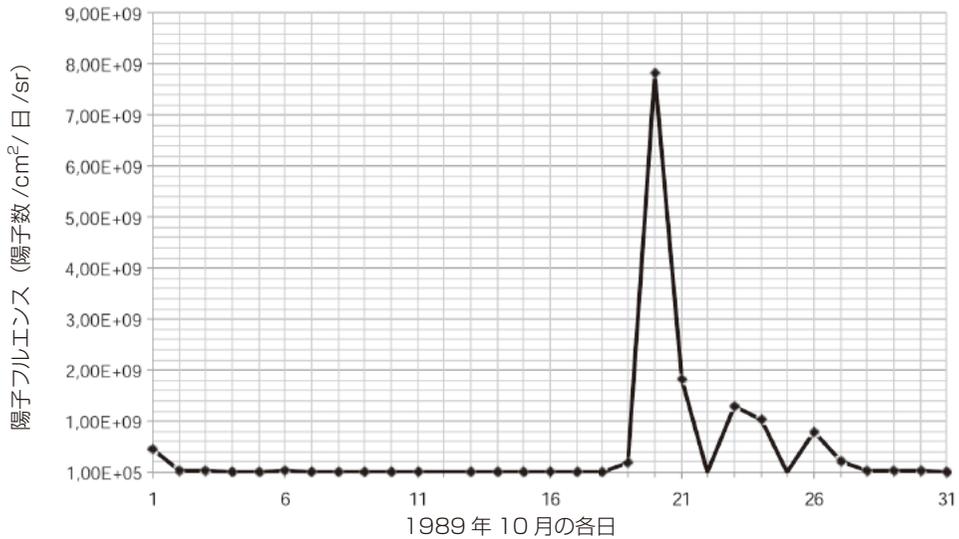


図 2.4 1989年10月1～31日の各日の陽子フルエンス (米国海洋大気庁* / 国立地球物理データセンターのウェブサーバーから得られたデータ)

*原文は National Atmospheric and Astronautics Administration. 確認により修正。

ば、GLE は 1942 年以降に 64 回観測されているが、これらのうち、12,000m における航空機乗務員の等価線量で、 $30 \mu\text{Sv}$ を上回る増大があると有意な確度で関連づけられたのは 18 回に過ぎなかった。これは、同様の航空飛行において太陽極小期に GCR によって受ける線量の 3 分の 2 に匹敵する。Lantos and Fuller (2003) は、12,000m において 1mSv を上回る線量増大につながる可能性があったと思われる GLE は 4 回に過ぎないと推定した。Beck et al. (2008) も、線量が 1 回の航空飛行で数百 μSv を上回る GLE はまれであると結論づけた。

(21) 委員会は、雷雨時に大気中に生じるガンマ線フラッシュへの航空機乗務員と乗客の潜在被ばくの可能性に関する懸念が近年提起されていることを承知している。宇宙放射線とは関係のないこの現象は、1991 年に米国航空宇宙局によって初めて観測された。「地球ガンマ線フラッシュ」と名づけられたこれらの放射は、従来の航空飛行高度において発生し、最大 20MeV のエネルギーで数ミリ秒持続すると思われる。それらの発生メカニズムの詳細は引き続き調査されているが、ガンマ線はおそらく、電光によって加速された電子により生み出され、光速に近い速さで進み、大気中の原子に衝突するだろう (Dwyer et al., 2012)。地球ガンマ線フラッシュと関連する航空機乗務員と乗客の潜在被ばくを評価するための実証された / 頑健な手法は、現在のところ存在しない。巨大な熱帯雲を避けるために進路を変更すること、またその雲の上に上昇しないことを航空機のパイロットに安全手順として要求すると記載されている (Desmaris, 2016)。しかし、航空機への落雷は毎年起きており、あらゆる関連する一時的現象のモニタリングは今後数年続くことになる。したがって、委員会は、その機会が合理的かつ利用可能になるのに従って、最適化の原則と整合する調査および対策を継続することを奨励する。

2.4 航空機における個人被ばくの評価

(22) 航空機における個人被ばくは、コンピュータプログラムを用いて比較的容易に推定することができる。実際に、航空機における宇宙放射線場はおおむね均一であり、所定の航空飛行の場合、個人が異なっても被ばくは同じである (Battistoni et al., 2005)。ほとんどのコンピュータプログラムの場合、大気は航空機がそれを通して航空飛行する立方体に分割され、ある立方体における平均実効線量率は、高度、地磁気緯度および太陽変調に左右される。立方体を横切る際の線量は、線量率と航空機が立方体を横切るのに必要とされる時間の積であり (図 2.5)、これは標準となる航空飛行プロファイルにより決定される。2 空港間の実際の航空飛行プロファイルは、主として天候条件のために、標準となる航空飛行プロファイルとは異なる可能性があるが、線量に対して有意な影響があるとは考えられない (Van Dijk, 2003)。

(23) 航空機における線量率を評価するコンピュータコードは、航空機における周辺線量当量率の測定によって検証し強固にすることができる。たとえばドイツでは、公式の線量計算のために用いられる計算プログラムを検証するために、2 機の旅客機に周辺線量当量率計が 4 年にわたって備え付けられた (Frasch et al., 2014)。周辺線量当量率の決定に関する詳細については、欧州委員会 (EC, 2004) によるものや、国際標準化機構 (ISO) の規格である ISO 20785 の 1～3 部 (ISO, 2011, 2012, 2013) など、さまざまな合意された規格の中で論じられている。

(24) EC (2004) は、1993～2003 年の期間にわたる測定および計算された周辺線量当量率を集約したデータを発表している。これらのデータは、ICRP と ICRU の共同刊行物 (ICRU, 2010) に示されている周辺線量当量の参考値を定める解析の主たる根拠となっている。これらの参考値は、航空機乗務員に対する線量評価のための日常手順の適合性をチェックするために

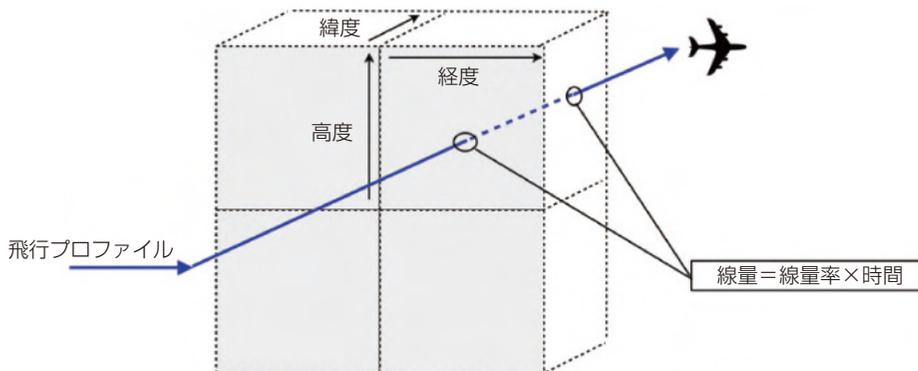


図 2.5 コンピュータコードによって用いられる、宇宙放射線による線量計算の例 (Bottollier-Depois et al., 2007)

表 2.2 異なる航空路について計算された実効線量の例 (2013年3月15日の飛行における値)

飛行のタイプ	総実効線量 (μSv)	平均線量率 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)
大西洋横断飛行：パリ－ニューヨーク	60	6.8
赤道横断飛行：コロンボ－ジャカルタ	9.7	2
極地横断飛行：北京－シカゴ	82	6.8

用いることができる。

(25) 航空機における職業被ばくの個人モニタリングが、ICRP (1997, 2007) によって勧告されている。個人線量は適及的に推定することができるため、委員会は引き続き、航空飛行時の個人被ばくのモニタリングのためには、測定装置（線量計およびその他の機器）を用いる代わりに検証されたコンピュータコードの利用で十分であると勧告する。これらのコードは、関係当局の要件を満たすはずである。そのようなコードの比較は、最近発表されている (EURADOS, 2012)。

(26) 一例として、専用コードを用いて推定された、3つの航空路の場合の実効線量を表 2.2 に見出すことができる。赤道横断ルートの場合の線量率の値が最も低い。異なる航空路におけるその他の線量例示は付属書 A にある。

2.5 航空機乗務員の被ばく

(27) 原子放射線の影響に関する国連科学委員会によって提示されたデータ (UNSCEAR, 2008) は、航空機乗務員の場合の平均年実効線量の範囲は数 mSv 程度であり (ある国において航空会社によって提供される航空路しだいで 1.2 ~ 5mSv)、最大値は約 6 ~ 7mSv であることが示されている。平均年実効線量は平均年間航空飛行時間に大きく左右され、これは欧州諸国では 600 時間、米国では 900 時間程度である。これらの線量推定値ならびに本刊行物に提示されている推定値は *Publication 60* (ICRP, 1991) に基づくものであることに注意すべきである。委員会は、放射線加重係数など、*Publication 103* (ICRP, 2007) で導入された線量計算の変更の結果として、線量は約 30% 低くなることを承知している。

(28) 欧州における航空機乗務員の被ばくのレビュー (Andresz and Crouail, 2015) は、平均年実効線量はチェコの航空会社の場合の 1mSv からフィンランドおよびスウェーデンの航空会社の場合の 2.5mSv まで、まちまちであることを示した。最も高い最大年実効線量は、デンマーク、ドイツおよびフィンランドの航空会社の場合の約 6 ~ 7mSv である (図 2.6)。米国における航空機乗務員の場合の平均実効線量は同等であり、2006 年で 3.1mSv と推定された (NCRP, 2009)。日本では、乗務員の年線量が 2007 年について評価されており、パイロットの場合は平均で 1.7mSv、最大で 3.8mSv、そして客室乗務員の場合は平均で 2.2mSv、最大で

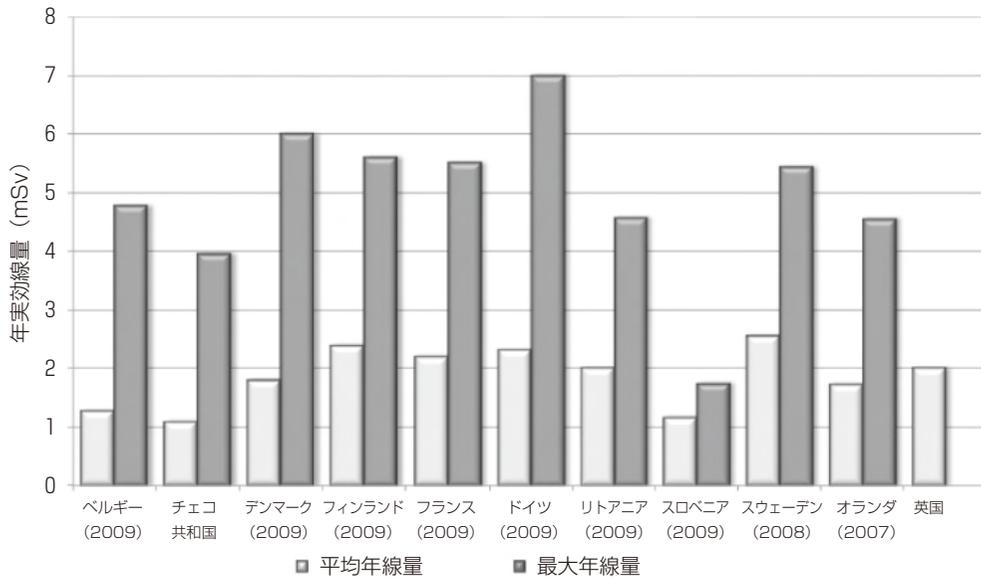


図 2.6 欧州における航空機乗務員の平均および最大年実効線量 (Andresz and Croüail, 2015)

4.2mSvであった (Yasuda et al., 2011)。例外的な事情を除けば、航空機乗務員が受けるのは1年あたり10mSv未満である。

(29) 航空機乗務員の被ばくは、総職業被ばくの重要な構成要素でもある。UNSCEAR(2008)によれば、世界における航空機乗務員の総集団年実効線量は800人・シーベルト程度である(記録されたあらゆる職業被ばく線量の70～80%)。国ごとの集団実効線量は主として、国の代表的航空会社の規模と年間航空飛行時間に左右される。集団実効線量は、特定の国の場合には1年あたり50人・シーベルトを超過しうる(たとえば、ドイツでは2012年に78.5人・シーベルト)。これらの集団線量は、職業被ばく全体への主たる寄与因子となっている。表2.3は、いくつかの国における航空機乗務員の場合の総職業被ばくを示したものである。

(30) 航空機乗務員が受ける個人線量の分布は、ガウス分布の形状を有する(図2.7)(実際には、この図は2つのガウス分布、すなわち、運航乗務員の分布と客室乗務員の分布の結合による結果を示している)。そのような被ばく(線量)分布は、線量が十分に低い管理の適用に値しないレベルで、比較的均一の被ばくを受ける集団に典型的なものである。比較すると、原子力産業における基本的な被ばく状況は一般に、航空飛行時のそれよりもはるかに変動的である。この事実および防護の最適化原則の適用により、一般に、はるかに非対称の線量分布をもたらす(たとえば、対数正規分布に近づく)。

表 2.3 航空機乗務員の集団線量 (UNSCEAR, 2008)

国	モニタリングした人数	集団線量 (man Sv)
デンマーク	3,990	6.8
フィンランド	2,520	4.2
ドイツ	31,000	60.0
リトアニア	160	0.2
オランダ	12,500	17.0
英国	40,000	80.0
米国	173,000	531

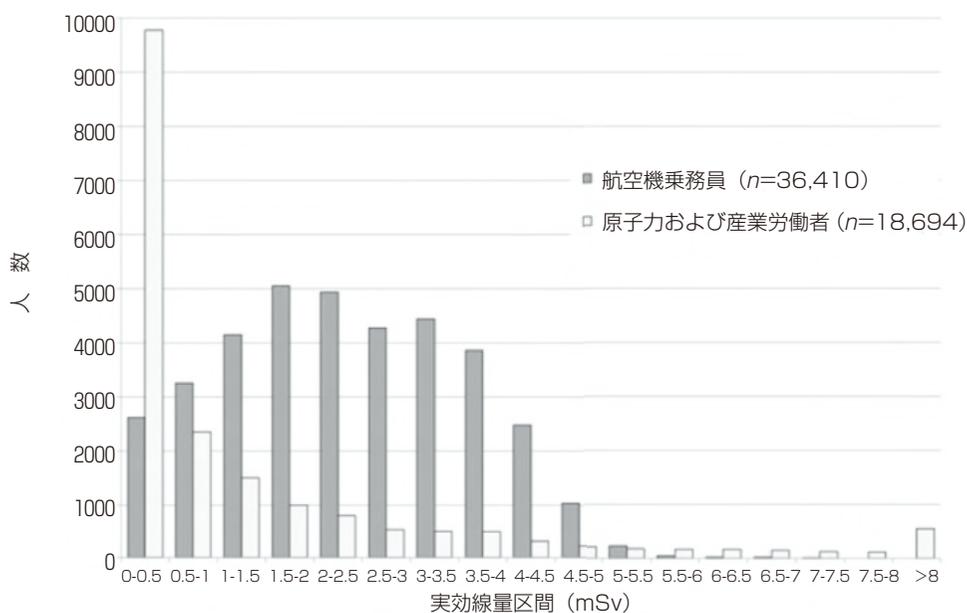


図 2.7 2009 年のドイツにおける航空機乗務員と原子力および産業作業者の年間線量の頻度分布 (Frasch et al., 2011)

2.6 航空機乗務員の疫学的調査

(31) 航空機乗務員の疫学的調査は、過去 25 年にわたって実施されてきた[Zeeb et al.(2012) によってレビューされた]。初期の調査は、カナダ、英国および日本のパイロットが対象であった。がんについては、パイロット（歴史的に、パイロットは事実上すべて男性だった）は一般集団と比較してがん死亡率の低下を示しており、これは職業コホートに健康作業員効果とし

て観察されることがよくある。しかし、いくつかの特定のがん、すなわち黒色腫と脳腫瘍は、航空機乗務員の場合に上昇するように見える (Zeeb et al., 2012)。

(32) 1990年代における第2世代の調査には、欧米人のより大規模な一連の調査が含まれた。以前に観察されたように、パイロットのがん死亡率は一般集団よりも低く、一部のがん（黒色腫と脳腫瘍）は「非常に軽度の過剰リスク」を示した (Reynolds et al., 2002)。ある調査は、女性客室乗務員（女性は客室乗務員の80%を占め、基本的には未経産の女性によって代表される）における白内障リスクのわずかな増加および、一般集団と比較して乳がん死亡率の「非常に軽度な増加」も示した (Rafnsson, 2005)。

(33) UNSCEAR (2006) は、黒色腫、黒色腫以外の皮膚がんおよび乳がんの一貫した過剰リスクの証拠が見つっていると述べた。しかし、雇用期間との関連は見出されておらず、個人線量に関する情報なしに、電離放射線被ばくまたは太陽紫外線への被ばくについて、観察された過剰リスクを相互に関連づけることは難しい。最近の研究は、乳がんの罹患率は宇宙放射線被ばくとは関係なく、これは経産回数減少および初産年齢の高齢化によって説明されるかもしれないことを発見した (Schubauer-Berigan et al., 2015)。

(34) 民間航空機乗務員の死亡率に関する研究では、平均22年にわたって94,000人の欧米人を追跡した (Hammer et al., 2014)。この研究は、一般集団と比較してがんと心血管疾患死亡率の全体的な低下を示した。運航乗務員については皮膚黒色腫による死亡率の増加が観察されたが、これは職業被ばくと直接には関連づけられず、色白の肌および日光浴が原因であると考えられた。他の研究とは逆に、女性の航空機乗務員について乳がんの増加は認められなかったが、男性の航空機乗務員において前立腺がんによる死亡率の増加が観察された。一般に、放射線関連がんによる死亡率は、以前の分析において報告されたものを下回った。航空機乗務員は電離放射線だけでなく、ストレス、日周期リズムの乱れやジェット燃料への曝露など、多くの潜在的リスク因子にもさらされるため、論文の著者はさらなる分析を推奨した。

(35) 結論として、委員会は、利用可能な疫学的データは航空機乗務員の勤務期間、関与する宇宙放射線による線量および放射線関連がんの過剰リスクの間に明確な関連性が見られないと認識している。電離放射線だけでなく、さまざまな潜在的リスク因子も考慮に入れたさらなる評価が必要である。

3. 乗客と航空機乗務員に対する ICRP の防護体系

(36) ICRP による人の放射線防護体系は、*Publication 103* (ICRP, 2007) に述べられている。44 項によれば、それは「その大きさと起源にかかわらず、あらゆる線源からのすべての放射線被ばくに適用される」。特に、45 項によれば、委員会の勧告は自然線源と人工線源の両方の被ばくを取り扱っている。

(37) *Publication 103* (ICRP, 2007) の考え方は、最適化プロセスを適切な線量制限値（線量の判断基準）より下に保つことを考慮事項の中心として、あらゆるタイプの被ばく状況に対する一貫したアプローチを勧告することである。

3.1 被ばく状況のタイプと被ばくの 카테고리

3.1.1 被ばく状況のタイプ

(38) 委員会は被ばく状況を、自然または人工の放射線源に始まり、さまざまな経路を通じて放射線または放射性物質が移動し、結果として生じる個人の被ばくのネットワークと定義している [*Publication 103* (ICRP, 2007) の 169 項]。防護は、線源または被ばく経路上の点において措置をとることにより、そして時には被ばくした個人の位置、被ばく時間および防護を変更することにより達成できる。便宜上、環境の経路は被ばくの線源と個人が受ける線量との結び付きを通常含む。

(39) *Publication 103* (ICRP, 2007) の 176 項によれば、委員会は、その勧告が、すべての考えうる状況を扱う次の 3 つのタイプの被ばく状況において、すべての線源に対して適用されるよう意図している。

- 現存被ばく状況とは、結果として生じる被ばくを管理する決定が行われる時点においてすでに存在する線源に起因する被ばく状況である。その管理にあたっては、被ばくの特徴づけが前提条件となる。
- 計画被ばく状況とは、線源の計画的な導入と運用の結果として生じる状況である。計画被ばく状況は、予期すること、および完全に管理することが可能である。
- 緊急時被ばく状況とは、計画された状況を運用する間に線源の制御喪失の場合において生じうる状況、もしくは制御されていない線源に関係するあらゆる予想外の事象により生じうる状況である。望ましくない被ばくを回避または低減するために、至急の対策が必要である。

(40) 委員会は、航空飛行時の人の宇宙放射線被ばくを現存被ばく状況とみなしている。

線源はすでに存在しており、それと関連して被ばくを制御するために防護に関するあらゆる決定が行われる。放射線源からの経路は、地球外から、大気から、航空機の構造物と内部からとなり、被ばくする個人は航空機乗務員と乗客である。被ばくを制御するための措置は、被ばくする個人の被ばく条件を変更することによってのみ実施することができる。委員会は、GLE は、大規模なものでさえ、飛行環境におけるその発生がまれであること、ならびに航空機乗務員と乗客の被ばくに対する寄与が結果的に小さいことを考慮して、現存被ばく状況の一部であると考えている（19 項、20 項を参照）。

(41) 委員会は、防護体系の見地から重要な因子は、防護を最適化し、特定の被ばく状況において個人のために合理的かつ有効な防護対策を講じる機会であると指摘する。委員会は、多くの因子が航空飛行の安全に影響を及ぼすことを、また、航空機乗務員は支配的状況に絶えず順応していることを認識している。事象を予測すること、航空機乗務員に対する情報提供を増進すること、そして適切な防護対策を講じることが合理的かつ可能になるのに従って、将来のいずれかの時点においてということであれば、委員会は、当局および業務管理者が最適化の反復プロセスの一環としてしかるべく対応することを期待するだろう。

3.1.2 被ばくのカテゴリー

(42) 委員会は3つの被ばくカテゴリー、すなわち、職業被ばく、公衆被ばくおよび医療被ばくを区別している。職業被ばくは、作業者が自らの業務の結果として受ける放射線被ばくである。しかし、放射線はどこにでも存在するゆえに、委員会は従来から「職業被ばく」の定義について、業務管理者の責任であると合理的にみなされうる状況の結果として業務上受ける放射線被ばくに限定している。医療被ばくは、医学的診断または治療の過程における患者の被ばくである。公衆被ばくは、職業被ばくおよび患者の医療被ばく以外のあらゆる被ばくを包含する。

(43) 航空飛行時、宇宙放射線に被ばくする集団には低頻度旅客、私的な理由または職務のための高頻度旅客および航空機乗務員が含まれる。委員会は、低頻度旅客および高頻度旅客の被ばくは公衆被ばくであり、航空機乗務員の被ばくは職業被ばくであるという見解を維持している（ICRP, 1991, 1997, 2007）。しかし、委員会は現在、それぞれのグループについて予想される被ばくのレベルおよび考慮されることが必要な責任を考慮に入れて、これら3グループの防護のためのグレード別アプローチを提案している（4.2 節）。

3.2 防護戦略の正当化

(44) 正当化の原則は、あらゆる被ばく状況に適用される2つの基本的な線源関連の原則の1つである。*Publication 103*（ICRP, 2007）の203項は、正当化の原則によって、放射線被

ばくの状況を変化させるいかなる決定も、害より便益を大きくすべきであると要求している。委員会は、現存被ばく状況の場合、正当化の原則は、被ばくを低減するとともにさらなる追加被ばくを回避するために対策を講じるかどうかを決定する際に適用されることを引き続き強調する。いかなる決定も、常に何らかの不利益を持ち、それが害よりも便益を多くもたらすべきであるという意味において正当化されるべきである。これらを踏まえて、*Publication 103* の 207 項に述べられているように、正当化の原則は、航空飛行時においては、宇宙放射線被ばくに対する防護戦略を実施すべきかどうかについて決定する際に適用される。

(45) 状況の特徴づけの後、最も広義には社会の、そのため必ずしも各個人のものではない、全体的な便益が結果として生じることを確実にするために、正当化を判断する責任は通常、政府または国の他の関係機関にある。しかし、正当化の決定への入力情報には、ユーザーもしくは政府または国の他の関係機関以外の他の組織や人物によって与えられるであろう観点が多く含まれるかもしれない。こうした事情から、放射線防護に関する考慮は、より広範な決定プロセスへの入力情報として役立つことになる。

(46) 航空機における被ばくを制御する可能性は限られているとはいえ (4.1 節)、委員会は、航空機乗務員が平均個人実効線量と平均集団実効線量のいずれの点からも最も高い職業被ばくを受ける集団の 1 つである (2.5 節) ことを考慮して、特に航空機乗務員については防護戦略の履行が正当化されると考えている。

3.3 防護の最適化

(47) 防護戦略の履行の正当化について決定が行われると、防護の最適化が、被ばくする個人を防護するための最も有効な対策を選択することを推進する原則となる。

(48) 最適化はあらゆる被ばく状況に適用される第 2 の原則であり、ICRP の放射線防護体系にとって極めて重要である。最適化は、経済的および社会的要因を考慮に入れて、個人線量の大きさ、被ばくする人の数および被ばくを受ける可能性を合理的に達成可能な限り、適切な個人線量の判断基準（個人線量規準）よりも低く保つためのプロセスと、委員会によって定義されている。これは、防護のレベルは支配的状況の下で最善のものであることを意味する。個人線量分布における重大な不公平を回避するために、委員会は最適化プロセスにおける個人線量の判断基準の利用を勧告する [*Publication 103* (ICRP, 2007) の 226 項]。

3.3.1 参考レベル

(49) 現存被ばく状況においては、参考レベルは、これを上回る被ばくの発生を許す計画は不適切であると判断され、したがって防護対策が計画され最適化されるべきである線量を表す。参考レベルは、経済的および社会的要因を考慮に入れて個人線量を合理的に達成可能な限

り低く保つための、またそのようにして線量分布における不公平を防止および低減するための、最適化プロセスにおける防護対策の選択指針である。したがって、参考レベルは、防護対策を適及的に判断可能にするための指標でもある。

(50) 現存被ばく状況の場合、委員会は、*Publication 103* (ICRP, 2007) の表 5 に示されている 1 年あたり 1 ~ 20mSv のバンド内に参考レベルを定めるよう勧告する。このバンドにおいては、線源または経路は一般に制御可能であり、個人は必ずしも被ばくそれ自体からではなく、被ばく状況と関連する活動から直接の便益を受ける。航空飛行時には、乗客は航空飛行から直接の便益を受ける（すなわち、快適かつ安全に迅速に移動すること）。他の職業電離放射線被ばくの状況と同様に、航空機乗務員は自身の雇用から直接の便益を受ける。

(51) 特定の被ばく状況の場合、委員会は、参考レベルの値が支配的状況に基づいて選択されるよう勧告する [*Publication 103* (ICRP, 2007) の 234 項]。この選択は、特に注意に値し最適化プロセスに有意義に寄与するような被ばくを特定するという目的に照らして個人線量分布を考慮すべきである。航空飛行時の宇宙放射線に対する防護の場合、委員会は、1 年あたり 5 ~ 10mSv の範囲の参考レベルを一般に選択するよう勧告する。

(52) 選択された参考値は、線量限度ではなく、経済的および社会的要因を考慮に入れて被ばくが合理的に可能な限りそれ未満に保たれるべき、そして低減されるべき線量のレベルを表す。個人線量限度の適用の原則は、計画被ばく状況においてのみ適用される [*Publication 103* (ICRP, 2007) の 203 項]。それでもなお、規制機関によっては、法的に拘束力のある値を課すための手順として、航空機乗務員に対する職業被ばくの線量限度を導入することを決定するかもしれない。

3.3.2 最適化プロセス

(53) 実際には、現存被ばく状況における防護の最適化は、(i) 被ばく状況の評価；(ii) 経済的および社会的要因を考慮に入れて被ばくを合理的に達成可能な限り低く保つまたは低減するために考えうる防護オプションの特定；(iii) 支配的状況の下で最も適切な防護オプションの選択および履行；そして (iv) 是正措置の必要はあるのかどうか、もしくは防護を増進する新たな機会は出現しているのかどうかを評価するための被ばく状況の定期レビュー、を伴うプロセスを通じて履行される。この反復プロセスにおいては、委員会は、個人被ばくの分布における公平の追求（すなわち、同様の状況の下で被ばくするグループにおける平均をはるかに上回る被ばくを一部の個人が受けるかもしれない可能性を制限するという目標）ならびに放射線防護文化の増進が重要な側面であると考えている (ICRP, 2006)。防護を最適化する際、委員会は、「ステークホルダーの視点や懸念を考慮する必要」も勧告する (ICRP, 2007)。

(54) 実際に最適化の原則を適用する方法に関する委員会の詳細な助言は以前に提供されており (ICRP, 1984, 1991, 2006)、引き続き妥当である。

4. ICRP の防護体系の履行

4.1 防護対策

(55) 航空飛行時の被ばくを制御するための潜在的な防護対策のレビューでは、この問題に上手く対処する余地はほとんどないことが示されている。*Publication 75* (ICRP, 1997) の中で、委員会は、「(宇宙放射線) 被ばくの制御は、おもに飛行時間の制限と航空路選択によって確保される」と指摘した。実際に、航空機(胴体)の遮蔽は実行可能なオプションではない。たとえば、12,000mにおいて20%の線量率低減を達成するには、1cm²あたり30gの遮蔽が必要である。飛行時間の制限および航空路選択でさえ、実施するのは難しい対策である。

- 飛行時間の制限。線量は飛行時間に左右されるため、航空機乗務員の勤務計画は空中にいる時間を制限する手段である。しかし、航空機乗務員の飛行時間を制限することは被ばくする人の数を増加させるし、その大規模な実施は社会的および経済的問題を引き起こすかもしれない。
- 航空路選択。航空路を選択し高度と緯度の問題に取り組むことによって被ばくを制限することは考えられる。

▷ 高度。2.2節に述べたように、地球の大気層は典型的な航空飛行高度においては宇宙放射線からのかなりの遮蔽をもたらす。航空飛行高度による最適化は、天候条件や航空交通などの因子を考慮に入れる微調整の問題であるが、コストの問題でもある。たとえば、航空飛行高度を1300m下げるとは線量を30%低減しうると推定されている。しかし、この高度変更は事故のリスクを増大させ、燃料消費およびコストも5%増加させる(Blettner et al., 2014)。

▷ 緯度。同じく2.2節に述べたように、地球の磁場は、もし磁場がなければ地上に達するであろう多くの宇宙放射線粒子を偏向させるが、この効果は赤道において最も有効であり、緯度が高くなると低下する。しかし、緯度による最適化、特に極圏飛行の航空路変更は、飛行距離、時間およびコストを増加させる。

(56) GLEの間の被ばくに関しては、飛行している航空機の高度を下げることで、および、まだ離陸していない飛行を遅らせることが考えられるだろう。これらの対策の実施は非常に複雑な情報システムを必要とし、これは今のところ、技術上および組織上の考慮事項を考えると開発がなお困難である。これらの対策は、すでに過密にスケジュールされている航空交通を混乱させ、事故の可能性を増大させることもありうる。

(57) 航空飛行時の被ばくを制御するための現在のオプションを考慮して、委員会は引き続き、航空飛行時の被ばくを制御するための主たる対策は、最も被ばくする個人の飛行スケジュールを飛行時間と航空路選択を考慮して調整することであると強調する。航空飛行時の防護については、委員会はここで、個人がその飛行頻度によって受けるとされる被ばくのレベルに従ったグレード別アプローチを勧告する。

4.2 グレード別アプローチ

(58) 航空飛行時の宇宙放射線からの防護のために重要な考慮事項は、航空機旅行を必要とする事情、個人が被ばくするかもしれない頻度、そして責任の所在である。これに関しては、私的な理由なのか、業務管理者の要請により自身の業務との関連で航空飛行する人かを区別することが重要である。

(59) 大多数の人の場合、航空輸送機関の利用は低頻度のイベントであり、宇宙放射線による線量は極めて低い（低頻度旅客）。私的にまたは自身の業務の過程においてのいずれかの事情によって航空機を高頻度で利用する少数の乗客の場合、線量は高くなる（高頻度旅客）。この少数の乗客の場合、防護のための単純なアプローチの1つは、これらの個人が自身の被ばくを評価し理解する機会を持てることである。より大きな線量を一般的に受ける航空機乗務員の場合、全員の個人線量の定期モニタリング、ならびに、線量が業務管理者の採用した参考レベルに近づきつつある個人については飛行勤務表の変更という方法に基づく、防護の適切な管理が必要である。

4.2.1 低頻度旅客

(60) 委員会は、低頻度旅客が受ける宇宙放射線による線量は十分に低いため、防護措置の導入を正当化する必要はないという見解である。

(61) しかし、透明性と「知る権利」の原則を適用するために、委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報をあらゆる乗客が入手できるようにすることを勧告するとともに、国の当局、航空会社、消費者団体および旅行代理店が航空飛行と関連する宇宙放射線に関する一般的事項の情報を広く発信するよう奨励する。たとえば、この情報は航空会社のウェブサイトに掲載することができるだろう。これらのウェブサイトは、航空飛行による線量を推定する妥当性が確認された無料の計算ツールを人々に認知させることができるだろう。付属書Aは、さまざまな国際航空路の典型的な推定実効線量を示している。

4.2.2 私的な理由または職務のための高頻度旅客

(62) 個人のグループがその私的な必要のためまたは便宜上、航空機を頻繁に利用する場

合がある。また、自身の業務管理者の要請によって頻繁に飛行する個人もいるかもしれない。ほとんどの高頻度旅客は、航空機乗務員と同じ状況の下で宇宙放射線に被ばくするのではない（たとえば、被ばく、飛行頻度や選択の程度の点で）。したがって、委員会は、高頻度旅客の被ばくは公衆被ばくとみなし（43項を参照）、また、被ばくする個人は、低頻度旅客と同じように扱われるよう勧告する。委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報をこれらの個人が入手できるようにすることを勧告する。

(63) さらに、委員会は、自身の被ばくについて懸念を持つかもしれない高頻度旅客が、自身の被ばくについて認知し、その必要を感じた場合には飛行頻度を調整するために、無料で利用可能な線量計算ツールを用いて自身の個人被ばくを評価するよう奨励する。

(64) 職務のための高頻度旅客のうち、ごく一部は、航空機乗務員の被ばくに匹敵する被ばく量になるような状況下で被ばくする。これはたとえば、文書および資材を輸送する配達人や航空保安官の場合がそうかもしれない。委員会は、これらの高頻度旅客の被ばくが航空機乗務員の場合に適用される要件と同様の方法で管理されるよう勧告する。問題となる職業の網羅的なリストを提示することは委員会の意図するところではなく、これらの高頻度旅客の被ばくを職業被ばくとみなす決定は、支配的状況に応じてケースバイケースで行われるべきである。このことは、個人が自身の被ばくを評価し、しかるべき場合にはこの情報を用いて自身の雇用主を対話に引き込むことになるかもしれない。決定は、関係するあらゆるステークホルダーが関与するプロセスの結果として行われるべきである。

4.2.3 航空機乗務員

(65) 委員会は、航空会社の管理者が、特別教育プログラムまたは訓練の集会を通じて、関係する航空機乗務員に放射線と宇宙放射線被ばくについて知らせるよう勧告する。情報は安全会議において乗務員に提供することもできると思われ、他の安全問題と整合をとるように重視されるべきである。

(66) 他の職業被ばくを受ける作業者と同様に、委員会は、航空機乗務員メンバーそれぞれの年実効線量が評価されるよう勧告する。年実効線量は、専用のコンピュータコードを用いて、職員勤務表と典型的な実効線量率から導き出すことができる。委員会は、線量計算の精度確認と検証のために、合意された規格に従った機内環境モニタリングの随時の利用を勧告する（ICRU, 2010）。委員会は、個人の累積被ばくとの関連において、GLEの寄与がリアルタイム警報システムのような特定のモニタリングシステムを必要とする（程度である）とは考えていない。しかし、委員会は、合理的に達成可能な場合は常に、GLEによる線量が遡及的に推定され、影響を受けた航空機乗務員の年被ばくに加算されるよう勧告する。委員会は、国際規則には15,000m超で稼働する航空機のためのモニタリング機器に関する仕様が含まれていることも指摘する（ICAO, 2010）。

表 4.1 航空飛行時に宇宙放射線に被ばくする個人に関する委員会の勧告

	被ばくする個人	勧告	被ばくのカテゴリー
1年あたり5～10mSv の範囲で選択されるべき 参考レベル	低頻度旅客	・ 一般的事項の情報	公衆被ばく
	高頻度旅客	・ 一般的事項の情報 ・ 線量の自主的評価 ・ 飛行頻度をしかるべく調整 するための個人的なイニシ アティブ	公衆被ばく*
	航空機乗務員	・ 個人的情報 ・ 個人線量の評価 ・ 個人線量の記録 ・ 特定の追加の医学的サーベ イランスは不要 ・ 飛行勤務表のしかるべき 調整	職業被ばく

* 高頻度旅客の一部のグループは、支配的な状況に対応したケースバイケースでの決定に基づき、職業被ばくを受ける人と同様の方法で管理される場合がある。

(67) 委員会はまた、航空機乗務員の線量が記録されること、ならびに、個人の年間線量と累積線量を当該個人が請求すれば入手できるようにすることも勧告する。将来行う可能性もある疫学的調査を円滑にするために、この情報は少なくとも当該個人の平均余命に匹敵する合理的な期間にわたって保存されるべきである (ICRP, 1997)。

(68) 航空機乗務員は、放射線安全以外の理由で定期的に健康診断を受ける。委員会は、宇宙放射線被ばくによる線量は特定の追加的な健康診断を必要とするものではないと考えている。一般に、定期的な健康診断は、宇宙放射線被ばくというトピックについて作業者と医師が対話を行う機会となる。

(69) 適切と判断されかつ選択された線量参考レベルを尊重する場合には、業務管理者は懸念される個人の勤務表を調整するかもしれない (飛行頻度か行き先、またはその双方)。

4.2.4 要約

(70) 表 4.1 は、個人の宇宙放射線被ばくに関する委員会の勧告を列挙したものである。

4.3 胚／胎児の防護

(71) *Publication 82* (ICRP, 1999) の中で、委員会は、現存被ばく状況の場合における出生前の被ばくは一般集団の場合における対策以外の防護対策を必要とするものではないと結論

づけた。したがって、委員会は、妊娠した女性の飛行勤務表を調整するための対策が必要になるとは考えていない。頻繁に飛行し、妊娠しているかもしれないもしくは妊娠の予定のある女性は、情報に基づく判断のために、望むかもしれないいかなる飛行勤務表の調整を行うにも十分な情報が提供されるべきである。

(72) 職業被ばくを受ける航空機乗務員については、妊娠した女性の場合の職場における防護の方法は、公衆の構成員に提供されているものとほぼ同様のレベルの、電離放射線からの胚／胎児の防護を提供すべきである、と委員会は勧告する。*Publication 103* (ICRP, 2007) の186項の中で、委員会は、「いったん雇用主が妊娠の届け出を受ければ、胚／胎児の追加の防護が考慮されるべきである。妊娠の申告の後、妊娠作業者の作業条件は、妊娠の残りの期間中の胚／胎児の追加線量がおよそ1mSvを超えないことを確実にするようにすべきである」と勧告した。

(73) 一般に、女性作業者は妊娠をできる限り早急に雇用主に知らせることが奨励される。国によっては、この決定は個人の自由意志の問題である。そうした対応の違いにかかわらず、妊娠した乗務員は妊娠を申告する前に1mSv超を受けるかもしれない。妊娠の適時の申告を奨励するために、委員会は、女性の航空機乗務員と高頻度旅客が宇宙放射線被ばくによる胚／胎児に対するリスクについて知らされるよう勧告する。申告後の妊娠の残りの期間に対する対策が作成されるべきである。

4.4 公衆への情報発信とステークホルダーの関与

(74) 経験のある科学者、専門家および放射線防護に関する訓練を受けた専門職を除いて、市民は通常、電離放射線とその潜在的な健康影響について知らされていない。宇宙放射線被ばくの問題については、航空機乗務員の大部分を除くと、地上での日々の生活において、また、航空機で旅行する際は高められたレベルで、絶えず宇宙放射線にさらされているとはいえ、この被ばくを気にしている人は公衆の中にはほとんどいない。しかし、近年、宇宙現象、特に太陽フレアに関する情報は増えており、宇宙および気象機関によって広く発信されメディアによって中継され、時には航空会社の警戒態勢を引き起こしている。この情報は、一部の乗客の宇宙放射線に対する注意を呼び起こしているが、宇宙放射線被ばくと関連するリスクについて高頻度旅客と航空機乗務員の間に疑問や時には懸念も引き起こしている。

(75) 人は自身の日常生活においてさらされているかもしれない潜在的なリスクについて知らされる権利があるとする「知る権利」の原則、ならびにその根底にある自律、公正および慎重という倫理的価値観に従って、委員会は、国の当局、航空会社、消費者団体および旅行代理店が航空飛行と関連する宇宙放射線に関する一般的事項の情報を広く発信するよう奨励する。この情報は容易に入手できるものでなければならず、宇宙放射線の起源、高度、緯度およ

び太陽活動周期の影響を示すとともに、一連の従来の航空路と関連する典型的な線量、および、まれではあるが強い GLE の場合に予想外の被ばくを受ける可能性を指摘するものとすべきである。

(76) 2.4 節および 4.2 節に述べたように、近年、容易に使えるツールがインターネット上でいくつか利用可能になっている。これらのツールは、あらゆるフライトについて線量計算を行うことを可能にしている。

(77) 委員会は、宇宙放射線に関する一般的事項の情報は、メッセージが正確であり、有益であり、状況に応じて放射線防護に関わる懸念および問題の性質に対処できるものとするよう勧告する。委員会は、個人が情報に基づく決定を行うことができるようにあらゆるリスクのより包括的な見方を促進するために、宇宙放射線は他のリスクまたは検討事項と釣り合うように考察されるべきであると提言する。

(78) この見地から、自然および人工の放射線源への他の被ばく状況との比較は有益かもしれない（たとえば、ロンドンからニューヨークへの航空飛行は高山地域で 10 日間の休日を過ごすのと同じ実効線量をもたらす）、宇宙放射線に関する一般的事項の情報の一部として入手できるようにすべきである。しかし、そのような比較は注意して行わなければならない。リスクの認知と許容は、状況の特性、特に状況が個人的な決定であるとみなされる度合い、そして被ばくにつながる活動の、個人にとっての便益に主として左右されるためである。

(79) 委員会は、航空飛行時の宇宙放射線に対する防護に関して、職業被ばくを受けるのではない乗客は自身の選択に引き続き責任を負わなければならないが、これらの選択は偏りのない関連情報に基づいて承知の上で行われるべきであると考えている。飛行頻度を減らす個人の決定は個人的な考慮に基づくことになるが、それらの考慮において宇宙放射線被ばくのリスクは他の多くのリスクの中の 1 つの要素に過ぎない。最後に、正確な情報に基づいてリスクの許容性を判断し、自らの防護のために決定を行うのは、そのリスクをとる個人の責任である。

5. 結 論

(80) 地球は、深宇宙および太陽からの粒子に絶えずさらされている。大気および地球の磁場は十分な遮蔽をもたらすため、地上における被ばくは特に重要ではないが、宇宙放射線被ばくは高度とともに増加する。この現存被ばく状況は、何百万もの旅行者、すなわち、私的な理由または自身の業務管理者の要請に因る乗客、ならびに最も高い被ばくを受ける職業集団に属する航空機乗務員が経験している。

(81) 委員会は、低頻度の航空飛行は地上における自然バックグラウンド放射線によって1年に受ける線量のごくわずかな増分に寄与するに過ぎないことを指摘し、防護措置の導入を正当化しない。一部の乗客は、私的な理由また極めて異なる理由から、宇宙放射線被ばくについて懸念するかもしれないことを委員会は認識している。したがって、委員会は、それらの乗客が情報に基づく決定を行うことを可能にするために、関連の情報を広く発信することを勧告する。

(82) 私的な理由または職務のための高頻度旅客については、委員会は同様に関連情報を広く発信することを勧告することに加え、個人が飛行頻度の調整をしかるべく考慮するために自身の被ばくの自主的評価の機会を利用するよう勧告する。航空機乗務員と同程度の累積滞空時間となる、職務のための高頻度旅客の特定のグループについては、委員会は、彼らが航空機乗務員の場合と同様の要件に基いて被ばく管理の方策を自身の組織と話し合うよう勧告する。

(83) 航空機乗務員の防護については、委員会は従来からの勧告を維持するとともに参考レベルの利用を導入し、この参考レベルは業務管理者によって選択されるべきである。1年あたり5～10mSvの範囲の値が一般に適切である。選択される特定のレベルは、その値が最適化プロセスに有意義に寄与できるように、支配的状況を考慮に入れるようにすべきである。宇宙放射線による被ばくを低減するための利用可能なオプションは極めて限られる。線量が選択された参考レベルに近づきつつある時に最も有効なオプションは、飛行勤務表の調整である。

(84) 上記の勧告をもって、委員会は、最も被ばくする個人——航空機乗務員と一部の高頻度旅客——の線量を、合理的に達成可能な限り、選択された参考レベルよりも低く保つことを期待している。委員会はまた、航空飛行時の宇宙放射線被ばくに対する総合的な意識を高めることによって、ステークホルダー間においてより多くの情報に基づく対話が行われることを期待している。関係するすべてのステークホルダー、すなわち、低頻度旅客、高頻度旅客および航空機乗務員は、航空飛行と関連する被ばくに関して情報に基づく決定を行うことを、さらに、航空機旅行から受けるあらゆる便益を考慮することを委員会は奨励する。

参考文献

- Andresz, S., Croüail, P., 2015. Results of the EAN request on the radiological protection of aircrew. European ALARA Newsletter n36. Available at: www.eu-alara.net (last accessed 14 May 2016).
- Battistoni, G., Ferrari, M., Pelliccioni, M., Villari, R., 2005. Evaluation of the dose to aircrew members taking into consideration aircraft structure. *Adv. Space Res.* **36**, 1645–1652.
- Beck, P., Bartlett, D.T., Bilski, P., et al., 2008. Validation of modelling the radiation exposure due to solar particle events at aircraft altitudes. *Radiat. Prot. Dosim.* **131**, 51–58.
- Blettner, M., Boehm, T., Bottollier-Depois, J-F., et al., 2014a. Strahlenexposition beim Fliegen – Ein Fall für den Strahlenschutz, Strahlenschutz Praxis, Heft 2, 3–30. TÜV Media GmbH, Köln.
- Bottollier-Depois, J.F., Blanchard, P., Clairand, I., et al., 2007. An operational approach for aircraft crew dosimetry: the SIEVERT system. *Radiat. Prot. Dosim.* **125**, 421–424.
- Desmaris, G., 2006. Is space weather forecast worthwhile for an airline in terms of radiation protection? Proceedings of the 54th International Congress of the International Academy of Aviation and Space Medicine, 2006, Bangalore, India.
- Desmaris, G., 2016. Cosmic radiation in aviation: radiological protection of Air France aircraft crew. *Ann. ICRP* **45**(1S), 64–74.
- Dwyer, J., Smith, D., Cummer, S., 2012. High energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena. *Space Sci. Rev.* **133**, 133–196.
- EC, 2004. Radiation Protection 140, Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew – Compilation of Measured and Calculated Data. European Radiation Dosimetry Group (EURADOS), Braunschweig.
- EURADOS, 2012. EURADOS Report 2012–03. Comparison of Codes Assessing Radiation Exposure of Aircraft Crew due to Galactic Cosmic Radiation. European Radiation Dosimetry Group, Braunschweig. Available at: http://www.eurados.org/~media/Files/Eurados/documents/EURADOS_Report_201203.pdf (last accessed 14 May 2016).
- Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Spiesl, J., Stegemann, R., 2011. Die berufliche Strahlenexposition des fliegenden Personals in Deutschland 2004 –2009. BfS-SG-15/11. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, p.42. Available at: https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-201108016029/3/Bf_2011_BfS-SG-15-11-ExpositionFlugPersonal.pdf (last accessed 14 May 2016).
- Frasch, G., Kammerer, L., Karofsky, R., Schlosser, A., Stegemann, R., 2014. Radiation exposure of German aircraft crews under the impact of solar cycle 23 and airline business factors. *Health Phys.* **107**, 542–554.
- Hammer, G.P., Auvinen, A., De Stravola, B.L., et al., 2014. Mortality from cancer and other causes in commercial airlines crews: a joint analysis of cohorts from 10 countries. *Occup. Environ. Med.* **71**, 313–322.
- Hess, V.F., 1912. Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift* **13**, 1084–1091.
- ICAO, 2010. Annex 6, Operation of Aircraft, Part I, International Commercial Air Transport – Aeroplanes, ninth edition. International Civil Aviation Organization, Montreal.
- ICAO, 2015. Air Navigation Report, International Civil Aviation Organization, 2015 Edition, Montreal.
- ICRP, 1965. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford.
- ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP* **1**(3).
- ICRP, 1984. Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation. ICRP Publication

39. *Ann. ICRP* **14**(1).
- ICRP, 1991. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP* **21**(1–3).
- ICRP, 1997. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. *Ann. ICRP* **27**(1).
- ICRP, 1999. Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. ICRP Publication 82. *Ann. ICRP* **29**(1/2).
- ICRP, 2006. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101b. *Ann. ICRP* **36**(3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* **37**(2–4).
- ICRP, 2013. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. *Ann. ICRP* **42**(4).
- ICRP, 2014. Radiological protection in security screening. ICRP Publication 125. *Ann. ICRP* **43**(2).
- ICRU, 2010. Reference data for the validation of doses from cosmic-radiation exposure of aircraft crew. Report 84. *J. ICRU* **10**(2).
- IRSN, 2016. SIEVERT version 2.2.4. Fontenay-aux-Roses, France. Available at: <https://www.sievert-system.org/?locale=en#Rayonnement> (last accessed 14 May 2016).
- ISO, 2011. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft –Part 2: Characterization of Instrument Response. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO, 2012. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft –Part 1: Conceptual Basis for Measurements. International Organization for Standardization, Geneva.
- ISO, 2013. ISO 20785. Dosimetry for Exposures to Cosmic Radiation in Civilian Aircraft –Part 3: Measurements at Aviation Altitude. International Organization for Standardization, Geneva.
- Lantos, P., Fuller, N., 2003. History of the solar particle event radiation doses on-board aeroplanes using semi-empirical model and Concorde measurements. *Radiat. Prot. Dosim.* **104**, 199–210.
- NCRP, 2009. Ionising Radiation Exposure of the Population of the United States. NCRP Report 160. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- Rafnsson, V., 2005. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots. *Arch. Ophthalmol.* **123**, 1102–1105.
- Reynolds, P., Cone, J., Layefsky, M., et al., 2002. Cancer incidence in Californian flight attendants. *Cancer Causes Control.* **13**, 317–324.
- Schubauer-Berigan, M.K., Anderson, J.L., Hein, M.J., et al., 2015. Breast cancer incidence in a cohort of U.S. flight attendants. *Am. J. Ind. Med.* **58**, 252–266.
- The New York Times, 1924. Lindbergh Does It! To Paris in 33 1/2 Hours; Flies 1,000 Miles Through Snow and Sleet; Cheering French Carry Him Off Field. 21 May 1924. The New York Times, New York. Available at: <http://www.nytimes.com/learning/general/onthisday/big/0521.html> (last accessed 14 May 2016).
- UNSCEAR 2006. Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, Volume 1, Annex A: Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. United Nations, New York.
- UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, Annex B: Exposures from Natural Radiation Source. United Nations, New York.
- Van Dijk, J.W., 2003. Dose assessment of aircraft crew in the Netherlands. *Radiat. Prot. Dosim.* **106**, 25–31.
- Yasuda, H., Sato, T., Yonehara, H., et al., 2011. Management of cosmic radiation exposure for aircrew in Japan. *Radiat. Prot. Dosim.* **146**, 123–125.
- Zeeb, H., Hammer, G.P., Blettner, M., 2012. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *J. Radiol. Prot.* **32**, 15–19.

付属書 A いくつかの航空路に関する宇宙放射線被ばく

表 A.1 いくつかの航空路に関する宇宙放射線被ばく

	Abu Dhabi (Emirates)	Johannesburg	Kuala Lumpur	Lima	London	Mexico (city)	Moscow	New York (city)	Rio de Janeiro (city)	Tokyo	San Francisco	Sydney
Abu Dhabi (Emirates)	0.016	0.012	0.052	0.04	0.03	0.012	0.077	0.031	0.07	0.109	0.058	
Johannesburg	0.016	0.049	0.048	0.015	0.036	0.058	0.005	0.015	0.016	0.024	0.028	
Kuala Lumpur	0.012	0.049	0.029	0.072	0.016	0.019	0.124	0.031	0.012	0.057	0.042	
Lima	0.052	0.048	0.029	0.052	0.013	0.065	0.019	0.014	0.058	0.022	0.072	
London	0.04	0.015	0.072	0.052	0.079	0.058	0.004	0.011	0.08	0.08	0.075	
Mexico (city)	0.03	0.036	0.013	0.079	0.032	0.045	0.023	0.023	0.062	0.005	0.078	
Moscow	0.012	0.019	0.065	0.058	0.032	0.064	0.02	0.02	0.014	0.134	0.039	
New York (city)	0.077	0.124	0.019	0.004	0.045	0.064	0.025	0.025	0.095	0.03	0.058	
Rio de Janeiro (city)	0.031	0.031	0.014	0.011	0.023	0.02	0.025	0.025	0.126	0.02	0.102	
Tokyo	0.07	0.012	0.058	0.08	0.062	0.014	0.095	0.126	0.043	0.043	0.07	
San Francisco	0.109	0.057	0.022	0.08	0.005	0.134	0.03	0.02	0.043	0.06	0.06	
Sydney	0.058	0.042	0.072	0.075	0.078	0.039	0.058	0.102	0.07	0.06	0.06	

SIEVERT ソフトウェア (<http://www.sievert-system.org/index.html>) を用いて 2016 年 3 月について計算された実効線量 (単位: mSv)

ICRP Publication 132
航空飛行時の宇宙放射線からの防護

2019年6月27日 初版第1刷発行

監修 甲斐倫明

翻訳 保田浩志

編集 ICRP刊行物翻訳委員会

発行 原子力規制庁

事務局 公益財団法人原子力安全研究協会

〒105-0004 東京都港区新橋五丁目18番7号

電話 国際研究部 代表(03)5470-1983

Email icrp-translation@nsra.or.jp

URL <http://www.nsra.or.jp>

© Nuclear Regulation Authority, Japan, 2019

Printed in Japan

DTP 株式会社フォレスト

【非売品】