

日本保健物理学会  
「航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会」  
における議論の紹介

日本保健物理学会 理事  
(国立大学法人 琉球大学 理学部)

古川 雅英

ふるかわ まさひで

*m\_furu@sci.u-ryukyu.ac.jp*

# 専門研究会設置の背景・経緯

## 国際的動向

- ・ ICRP1990年勧告（航空機乗務員の宇宙線被ばくを職業被ばくの範囲に含める）を受けて、先進国の一部（特にEU加盟国）がガイドラインの作成を進めている。

## 国内の動向

- ・ 2004年2月に航空機乗務員団体（日本乗務員組合連絡会議及び客室乗務員連絡会）が宇宙線被ばくの実態把握と適切な管理を要望する要請書を国に提出。
- ・ マスメディアによる報道、社会的関心の高まり。
- ・ 文部科学省等の関連部局が、法的管理の必要性等に関する検討を開始。

## 日本保健物理学会

- ・ 既に「人為的に高められた環境放射線専門研究会」（報告書は学会HPに掲載）等において宇宙線被ばくの問題を検討。
- ・ さらに検討を加え、本問題に対する放射線防護の専門家としての見解を社会に提示し、航空機に搭乗する人々が抱く不安の解消に努めるため、当専門研究会を設置し、宇宙線被ばくに関わる最新の情報を効率的に整理・吟味。

設置期間：2004年10月～2006年3月

## これまでの活動経過と予定

2004年10月21日 第1回会合 (日本大学歯学部3号館)

2005年01月13日 第2回会合 (日本大学歯学部3号館)

2005年04月27日 第3回会合 (日本大学歯学部3号館)

2005年07月01日 中間報告

第39回保健物理学会におけるシリーズ発表 (六ヶ所村)

2005年09月 第4回会合 (予定)

- ・ 検討結果の取りまとめと公表 (学会刊行物、学会ホームページ)
- ・ 航空機乗務員・乗客を対象とした分かり易い教材の作成 (「Q & A」など)

# 第39回日本保健物理学会 シリーズ発表「航空機被ばくの問題点」

- 1 . 古川雅英（琉球大学） . . . . 趣旨説明
- 2 . 野口邦和（日本大学） . . . . 被ばく管理に関する動向
- 3 . 吉永信治（放医研） . . . . 乗務員の疫学調査
- 4 . 義澤宣明（三菱総研） . . . . 宇宙放射線被ばくの評価方法
- 5 . 佐藤達彦（原研東海） . . . . 航路線量の計算手法
- 6 . 保田浩志（放医研） . . . . 航空機内被ばくの何が問題か  
（被ばく管理の手法）
- 7 . 総合討論  
横山須美（原研東海） . . . . コメント

# 航空機乗務員の被ばく管理に関する海外の動向

## 国際放射線防護委員会 (ICRP)

1990年勧告 (Pub.60)の中で、航空機乗務員の宇宙線被ばくを職業被ばくとして管理されるべきであることを勧告。

## 欧州放射線防護指令 (Council Directive 96/29/ EURATOM 1996)

欧州連合 (EU) は、航空機乗務員の宇宙線被ばく管理に関する国内法の整備を加盟各国に対し求めている。 欧州各国で対応中

### ドイツ

- ・年1mSvを超える可能性があるとき、飛行中に受ける実効線量を算定しなければならない。
- ・年6mSv以上の実効線量を受け得る結果となった者については、医師の診断を受ける。
- ・健康上の懸念のないことが証明された場合にのみ、業務を継続できる。
- ・線量算定の記録は、75歳まで、業務の終了後少なくとも30年間保存しなければならない。
- ・妊婦については、妊娠期間中の線量限度は1mSvとする。
- ・航空機乗務員に対する宇宙線による実効線量限度は年20mSvとする。

### 英国

- ・2000年に輸送省管轄の航空規則に欧州放射線防護指令を取り入れて改正。
- ・基本的に欧州放射線防護指令に適合。
- ・被ばく線量が年1mSvを超えない場合は、個人管理は不要である。
- ・年1mSvを超える場合 (高度8km以上に相当) はコンピュータによる線量評価を行い、記録する。
- ・年6mSvを超えそうであれば、被ばく線量の測定、業務管理と線量低減の措置を講じる。
- ・線量限度は、年10mSvを超える期間の搭乗はないので定めない。
- ・高高度 (15km以上) の運航については、短期間の変化を検出する放射線モニターを搭載する。

# 国際定期航空操縦士協会連合会 (IFALPA)

(93カ国10万人の定期航空操縦士で構成、本部はロンドン)

## 2003年に航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関する Policy Statement (POL-STAT 2003) を採択

### 【前文】

- 航空機乗務員は、日周体内周期律動障害、慢性疲労、低い気圧、軽度の低酸素症、低湿度のもとで業務を遂行し、さらに騒音、振動、宇宙放射線、電磁波などにさらされている。
- これらの職業上の環境要因は、長期的には航空機乗務員の健康阻害要因となる可能性がある。なかでも宇宙放射線被ばくとその発ガン性、突然変異誘発性は非常に注目されている。
- 地上における被ばく労働者の年間被ばく線量を低減させることは成功しているが、一方、航空機乗務員の被ばく線量は地上の被ばく労働者よりかなり高いレベルにあり、さらに今後被ばく線量の増加が見込まれる。
- 以上のことから、航空機乗務員の宇宙放射線被ばく問題に関する包括的な調査は急務である。コックピット環境における他の要因の混在を銘記したうえで、本ポリシーは航空機乗務員を宇宙放射線被ばくによる潜在的な健康リスクからの防護を提供することを目的とする。

## Policy Statement (POL-STAT 2003)の概要

- 高度8000mを超えて運航するすべての航空機で宇宙線被ばく線量のアセスメント ( 国際民間航空条約機構ICAOは15000mを超えて運航する航空機についてのみ規定)
- 高度8000mを超える運航に従事する乗務員の累積線量のアセスメント
- 乗務員の教育と疫学調査の一助となるよう、航空会社が勤務表と適切な被ばく線量算定プログラムを統合し、乗務員の被ばく線量記録を作成するよう勧告
- 妊娠中の乗務員の胎児が1mSvを超えて被ばくすることのないよう、航空会社は飛行勤務の調整を規定化すべき

# 日本国内の動向

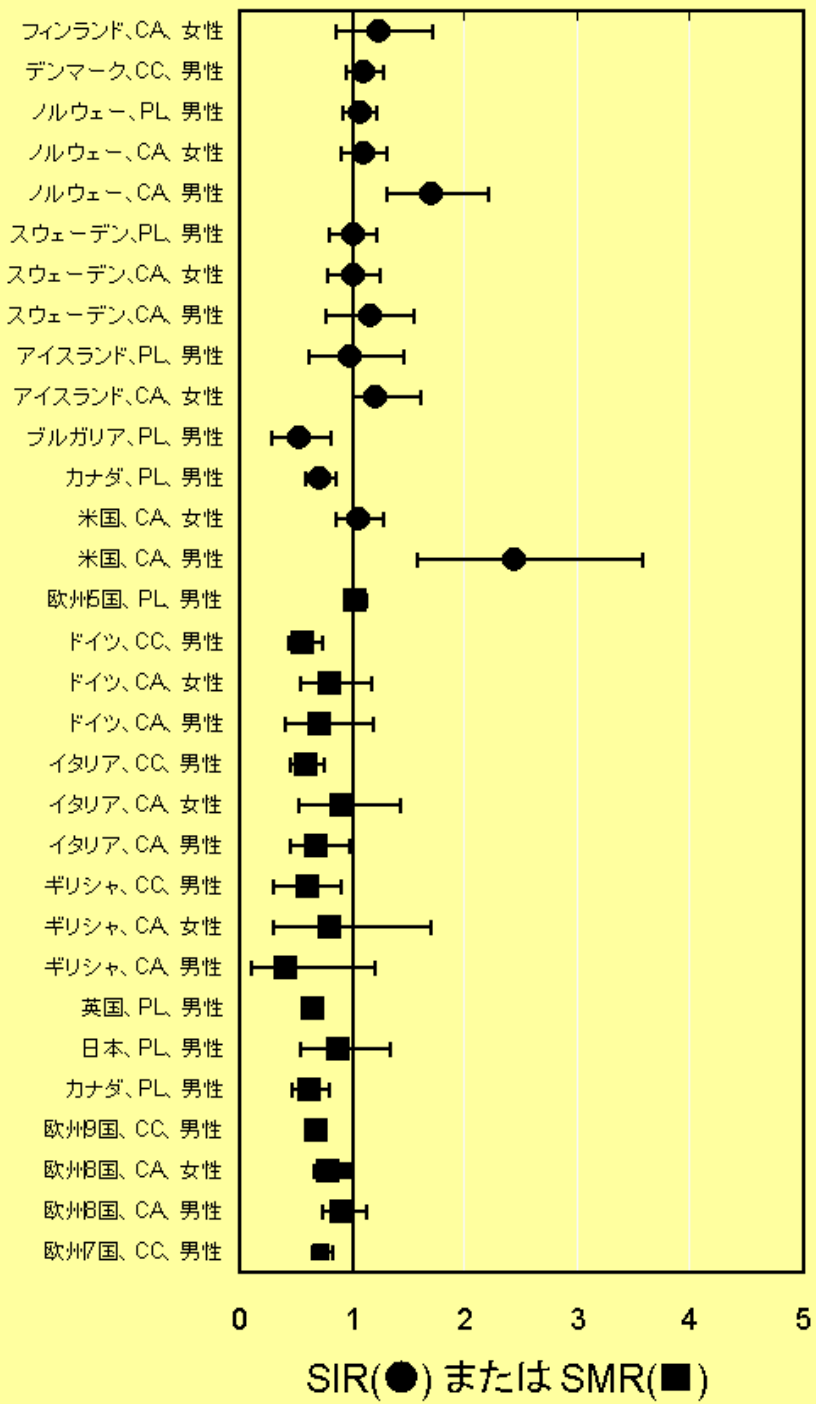
- 1996年3月28日  
日本乗員組合連絡会議（日乗連）、JAL客室乗務員組合、  
JAL機長組合、JAL先任航空機関士組合  
航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関する要請
- 2004年2月6日  
日乗連、客室乗務員連絡会  
航空機乗務員の宇宙線被ばく防護に関する再度の要請

\* 日乗連は、IFALPA（国際定期航空操縦士協会連合会）に加盟しており、2002年時点で会員数は約5400人（日本の全乗員の95%）、IFALPAでは世界第3位の構成員数

# 航空機乗務員の疫学研究

## －29文献の検討結果－

- **航空機乗務員における全がんのリスク：**  
一般集団と比較して 同程度かやや高い
- **航空機乗務員における女性乳がんのリスク：**  
一般集団と比較して 罹患リスクがやや高い  
出産歴等のライフスタイル？  
ただし、最近の症例対照研究（Rafnsson et al. 2003）ではこれらの要因を調整後も、乗務歴と有意な関連。
- **航空機乗務員における皮膚悪性黒色腫のリスク：**  
一般集団と比較して ばらつきが大きいが高い  
余暇活動に伴うUV曝露の影響？  
ただし、最近の症例対照研究（同上）では、乗務員と一般集団の間に、UV曝露等の差はなかった。



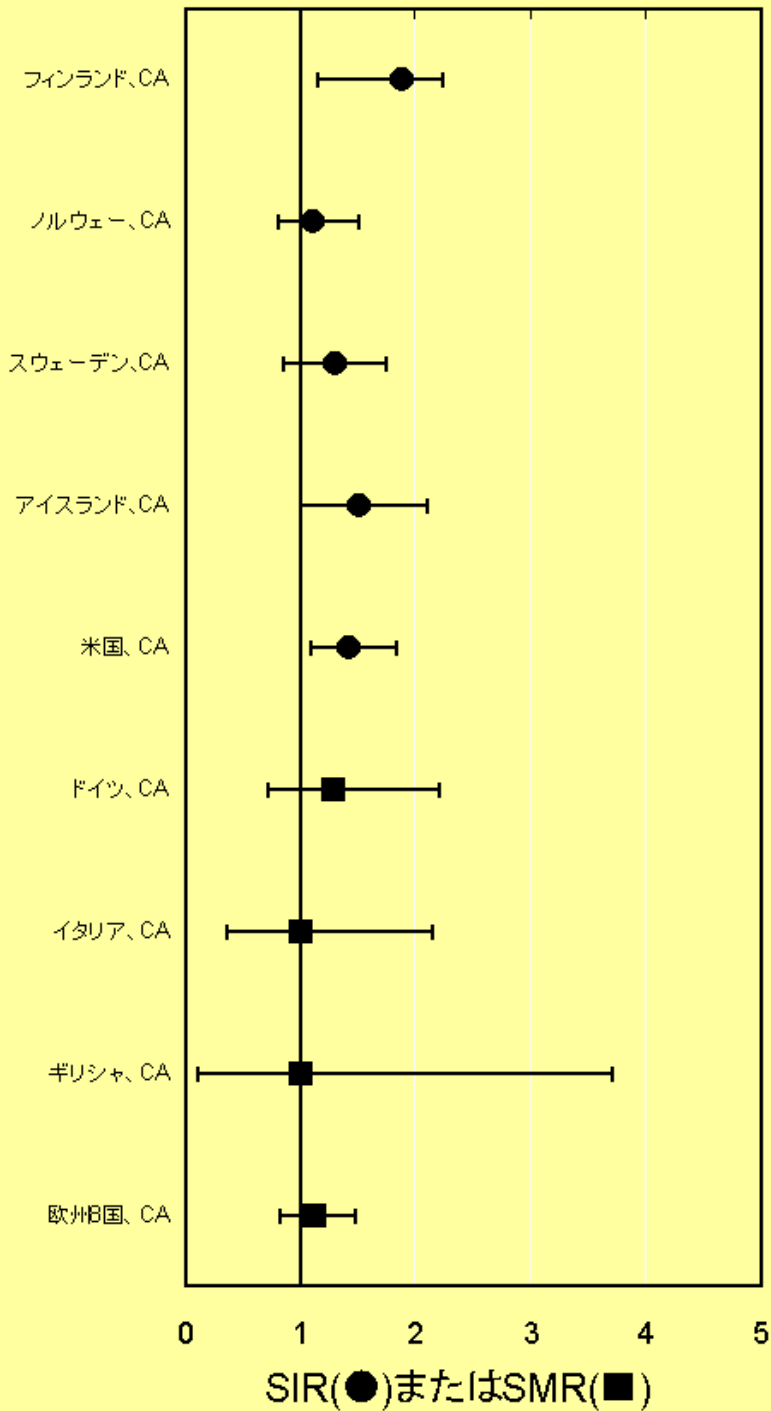
# 全がんのリスク

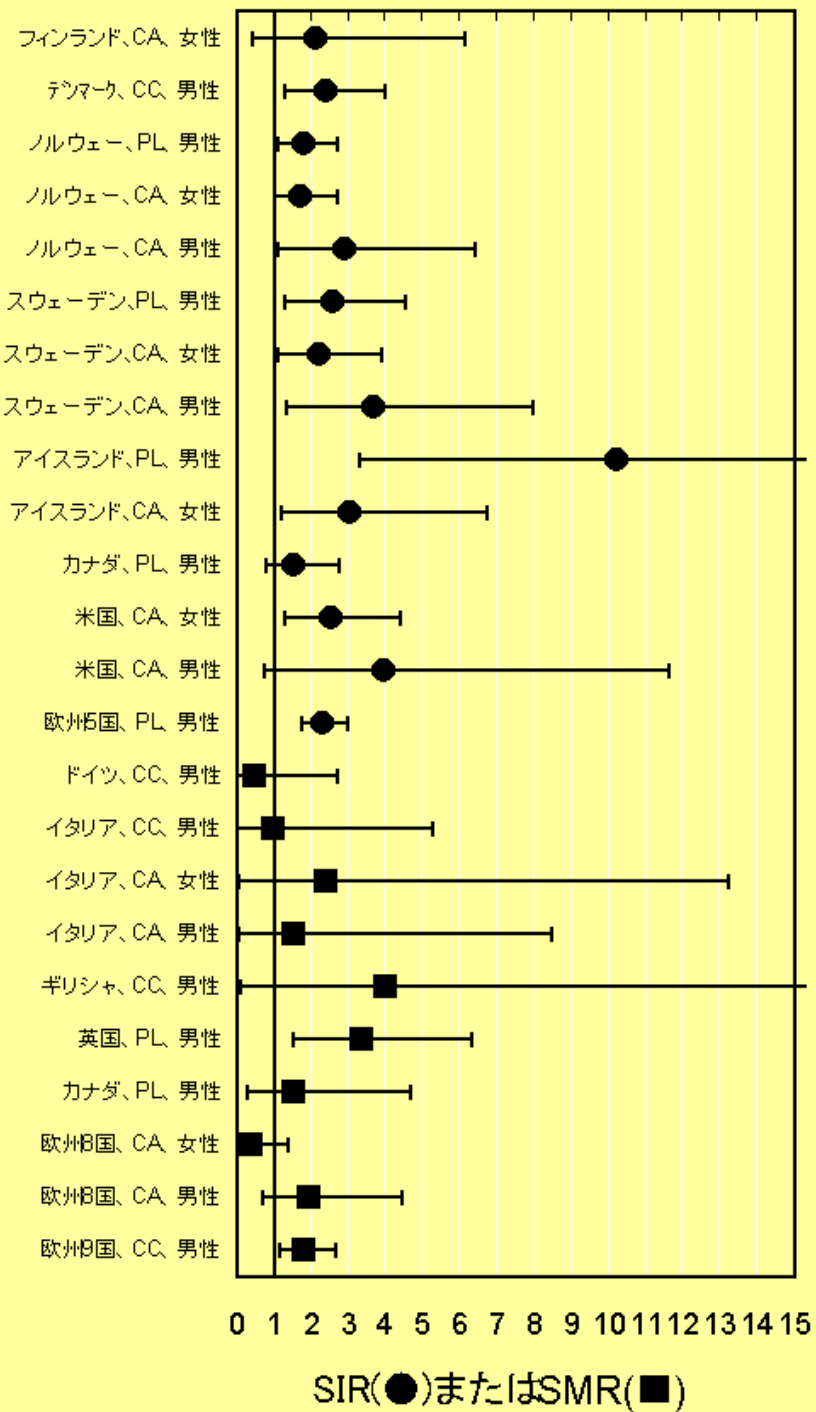
同程度であるがやや高い集団がある

吉永・保田（放射線科学, 2005）および吉永（保健物理学会, 2005）による

# 女性乳がんのリスク 罹患リスクがやや高い

吉永・保田（放射線科学, 2004）および吉永（保健物理学会, 2005）による





## 皮膚悪性黒色腫のリスク

バラツキが大きいですが、全体的に高い傾向が認められる

吉永・保田（放射線科学, 2004）および吉永（保健物理学会, 2005）による

## 問題点

- 宇宙線被ばく線量とがんリスクとの関連は明瞭でない。  
線量評価が不十分：累積線量や航路別線量などの不確実性  
適切な対照集団の欠如：健康労働者効果  
潜在的な検出力不足：低線量被ばくの疫学研究に共通
- 有意とされた結果であっても、交絡因子、バイアス、少数症例に基づく偶然などの可能性がある。さらなる調査が必要。  
交絡因子の情報欠如：ジェット燃料や電磁波など、乗務そのものに  
関連した因子と、ライフスタイル関連の因子

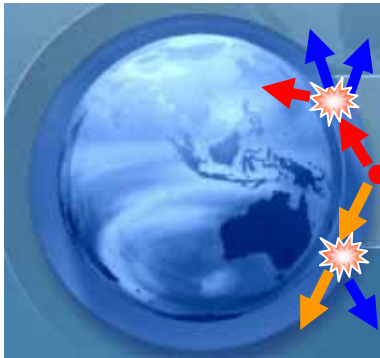
# 航路線量の計算手法

## 大気に入射する宇宙線スペクトル計算

- 銀河宇宙線の基本スペクトル
- Solar Modulation (太陽風による遮へい) 効果
- 地磁気による低エネルギー粒子のカットオフ



## 大気中の粒子輸送計算



- 陽子・中性子・重イオンの核反応モデル
- 厚い大気に対する深層透過計算

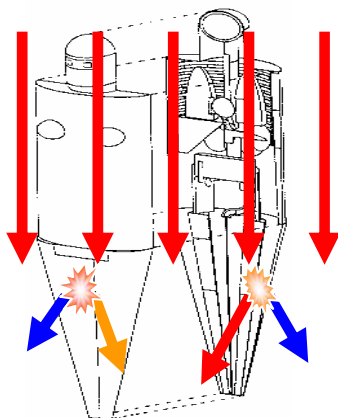
次につづく...

## 航空機内の粒子輸送計算



- 核子の核反応モデル
- 3次元粒子輸送コード

条件によっては機体が線量を最大20%遮蔽



## 人体内の粒子輸送計算

- 核子の核反応モデル
- 3次元粒子輸送コード
- 人体モデル（数学orボクセル）

従来の原子炉やRI施設では考慮する必要のなかった  
高エネルギー中性子や陽子に対する計算が必要

## 航路線量

## 総合計算コードの例

- EPCARD (欧州・GSF)

EPCARD: [http://www.gsf.de/epcard2/informationen\\_en.phtml](http://www.gsf.de/epcard2/informationen_en.phtml)

大気入射粒子スペクトル: NASA

大気中粒子輸送計算: FLUKA

航空機内粒子輸送計算: なし

線量換算係数: MCNPX

- CARI-6 (米国・FAA)

- PCAIRE (カナダ)

# PHITS (Particle & Heavy Ion Transport code System)

これをベースに  
より高精度で日本の実情に適した総合計算コードの製作

## 幅広いエネルギー範囲の全ての粒子に対する輸送及び核反応

0.025eV ~ 200GeV

中性子, 陽子,  $\alpha$ ,  $\mu$   
光子, 電子, 重イオン

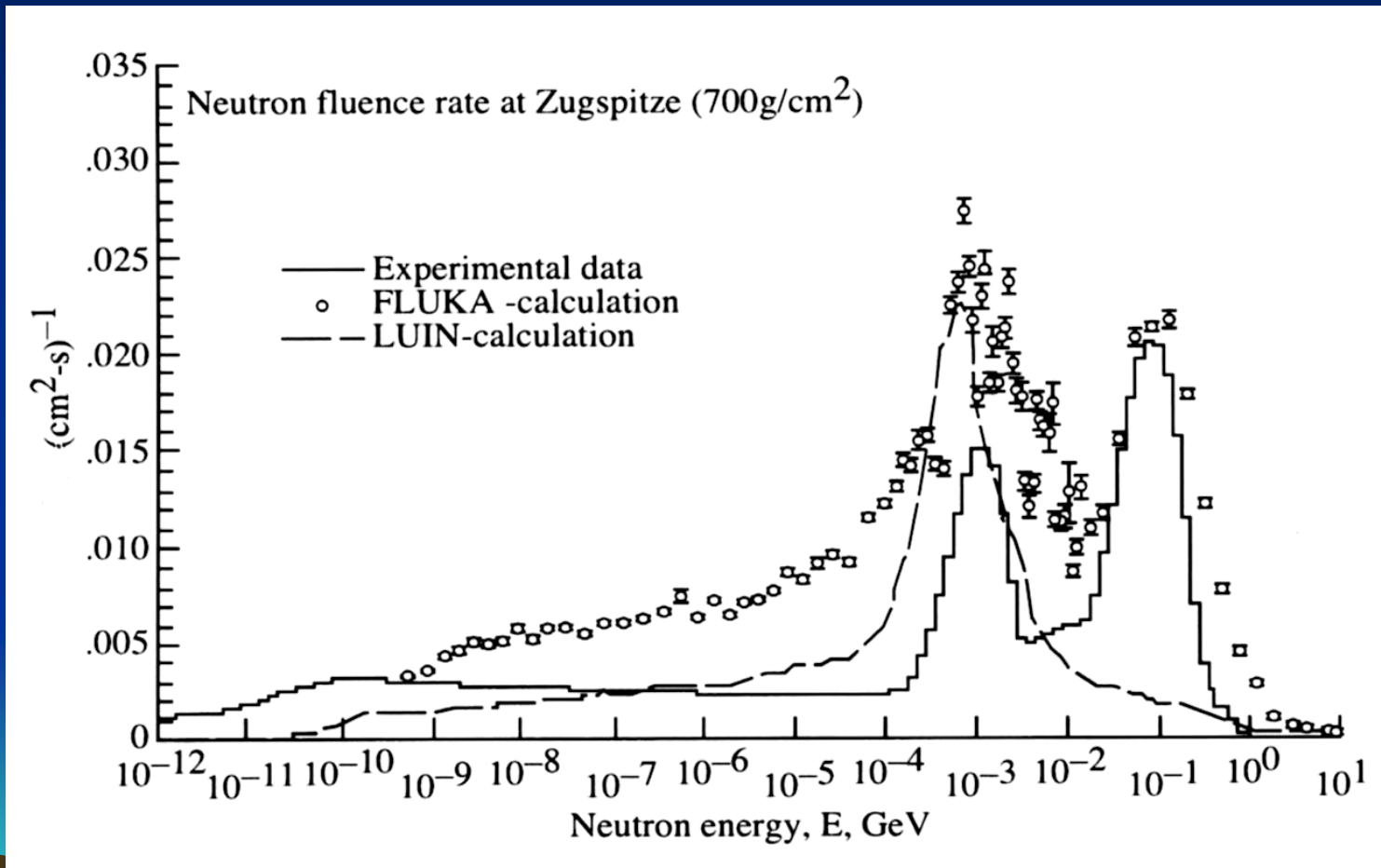
3次元空間  
重力, 磁場も考慮

核データライブラリ  
INC, QMD

- 大気入射スペクトルの計算法の選択
- 太陽活動の強さ, 緯度・経度によるCutoff Rigidityの決定法
- PHITSによる大気中粒子スペクトル計算結果のパラメータ化
- 総合パッケージ化

## 問題点(1)

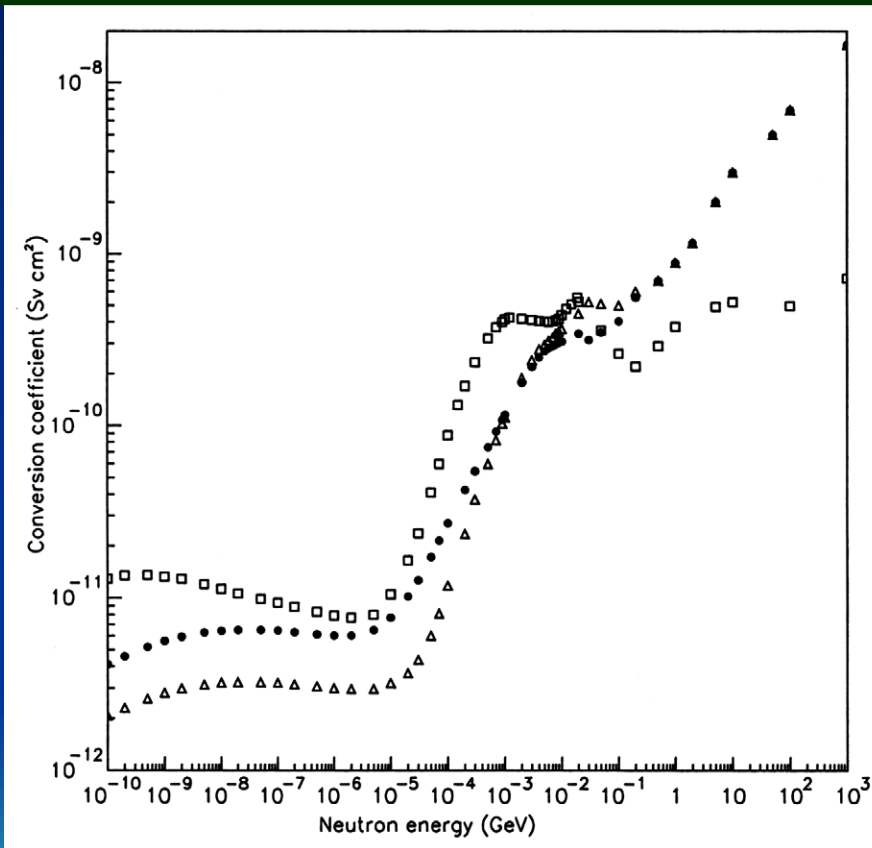
航空機高度における中性子及び陽子のエネルギースペクトルをモデル化するには情報が不足している **実測が必要**



オーストリアのZugspitze山頂(海拔2,963m)における中性子エネルギースペクトルの実測値と計算値(Schraube et al. 1998)。

## 問題点 ( 2 )

現在の放射線防護体系(放射線荷重係数)は、エネルギーの高い宇宙放射線に対して十分対応できているとは言い難い。



宇宙線のうち相当の割合を占める高エネルギー中性子(>20MeV)に対しては、実効線量が1cm周辺線量当量を上回ってしまう。現実的な係数に改訂する必要有り

中性子等方照射(ISO)におけるフルエンス - 実効線量及びフルエンス - 周辺線量当量の換算係数(Pelliccioni, 2004);ここで、 $\square$ はICRP Publication 60の放射線荷重係数に基づく実効線量に対する値、 $\circ$ はICRP Publication 60のQ(L)関数に基づく1cm周辺線量当量に対する値、ICRP Publication 92(ICRP, 2003)で提案された放射線荷重係数に基づく実効線量に対する値( $\triangle$ )も併せて示している。

## 問題点（3）

### 太陽フレアによる潜在被ばく

高緯度路線を飛行中に観測史上最大級（1956年2月相当）の太陽フレアに遭遇した場合、数mSv（～5mSv）の被ばくを受ける可能性がある。ただし、同規模の被ばくをもたらすようなフレアは、この50年間は観測されておらず、推定される発生頻度はごく小さい。

・想定すべき太陽フレアの規模や発生頻度については、更なる調査研究が必要。

・また、被ばくを回避するための方策（衛星情報に基づく飛行時期・高度の調整等）の可能性や有効性についても検討が望まれる。

## 線量限度を考えるための試算

欧州指令等において妊婦の線量限度とされている1mSv/年、ドイツ等の管理基準である6mSv/年、職業被ばく限度(5年平均)の20mSv/年を制限値とした場合の搭乗可能回数(成田発着便)

都市名	実効線量 (往復) [ $\mu$ Sv]	搭乗制限回数			
		1mSv $y^{-1}$	6mSv $y^{-1}$	20mSv $y^{-1}$	
アメリカ	ニューヨーク	210	4.8	28.6	95.4
	シカゴ	189	5.3	31.7	105.7
	ロサンゼルス	115	8.7	52.0	173.3
	ホノルル	54	18.5	111.1	370.4
ロシア	モスクワ	131	7.6	45.7	152.4
ヨーロッパ	ロンドン	188	5.3	32.0	106.6
	パリ	185	5.4	32.4	107.9
	フランクフルト	175	5.7	34.4	114.5
アジア	北京	25	39.7	238.1	793.7
	香港	26	38.2	229.0	763.4
	シンガポール	39	26.0	155.8	519.5
オセアニア	シドニー	62	16.1	96.5	321.5

## まとめ(1)

- ・航空機乗務員の被ばくが職業人の被ばく限度(年平均で20mSv)を超えるケースは、想定し難い。しかも、年間6mSvを超える日本人乗務員はごくわずかであると考えられる。
- ・妊娠が判明した女性乗務員は地上勤務に移るのが通例であり、妊娠判明後に胎児の被ばく線量が1mSvを上回るケースはごく稀であると考えられる。
- ・疫学調査による宇宙線被ばく線量とがんリスクとの関連は明瞭でない。ただし、宇宙線被ばくによって健康リスクが生じている可能性を否定できない。

**更なる疫学調査と関連データの  
取得・蓄積が必要**

## まとめ(2)

- ・ 欧米において乗務員に対して現在実施されている線量評価はモデル計算による。
- ・ すべての航空機に精密な宇宙線測定器を搭載し、世界中で時々刻々得られるデータをすべて解析することには困難が伴う。また、搭載性に優れた簡易な線量計を用いた場合は測定精度の問題があり、結局、モデル計算による評価を併用することになる。

したがって、

- ・ 航空機搭乗者が受ける線量は、データの一貫性を保つためにも、モデル計算によって評価することが妥当と考えられる。

**高精度の総合計算コードの開発が必要  
(PHITSをベースとして構築)**

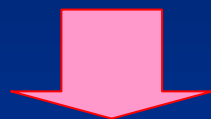
## まとめ(3)

- ・航空機高度での宇宙線被ばくは、地上とは異なり、高エネルギーの中性子( $\sim 1\text{GeV}$ )及び陽子( $\sim 100\text{GeV}$ )がもたらす線量の評価が重要となる。
- ・航空機内において実測した高エネルギー( $\sim 1\text{GeV}$ )の中性子及び陽子のエネルギースペクトルを精密に検証することにより、疫学調査や、航路線量計算の精度・信頼性を向上させることが望まれる。

**搭載性に優れた高エネルギー粒子線測定技術の新規開発と、これによる実測が必要**

## まとめ(4)

・ ICRP1990年勧告で示された放射線荷重係数 ( $w_R$ ) 値を用いて航空機搭乗者の実効線量を計算した場合、同勧告で提示されている線質係数で計算した周辺線量当量を上回ってしまう。粒子線の生体に対するエネルギー付与の機構を考えても、現状の $w_R$ 値は適当とは言い難い。

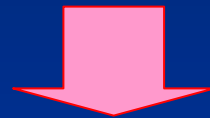


・ 新勧告では、中性子及び陽子の $w_R$ 値が変更される予定。  
・ 新たな係数値が示された後は、航空機搭乗者の線量を再計算することが必要。

今後も、宇宙放射線を適切に扱えるよう、放射線防護の体系を更に拡張・整備(特に日本からのデータ提供)していくことが望まれる。

## まとめ(5)

航空機内被ばくの問題には、乗務員だけでなく、多くの関係者(乗務員、乗客、運用者、提携会社、規制当局、マスコミ等)が関与している。対策実施の検討を含む当問題への対応には、意見交換を通して関係者の理解と協力を得ることが重要。



最適な解を導き出すためには、中立的立場の専門家および非専門家を交えた関係者間の合意形成が必要である。そうした意見交換の場を提供する母体として、日本保健物理学会が貢献すべきである。

# 非専門家への情報伝達

- 様々な関係団体からの情報発信
  - キャセイパシフィック
    - <http://www.cathaypacific.com/ae/pretrip/smart/0,,43218,00.html>
  - 英国航空
    - [http://www.britishairways.com/travel/healthcosmic/public/en\\_gb](http://www.britishairways.com/travel/healthcosmic/public/en_gb)
  - 米国の航空機乗員組合
    - <http://www.unitedafa.org/cmt/shs/rad/radiation.asp>
  - 米国保健物理学会のQ&A
    - <http://hps.org/publicinformation/ate/faqs/commercialflights.html>
  - FAAからのメッセージ(2005年2月)
    - <http://www.cami.jccbi.gov/AAM-600/Radiation/trainingquestions.htm>
  - Cancer Help(英国:航空機乗務員からのがんに関する質問)
    - <http://www.cancerhelp.org.uk/help/default.asp?page=9270>
- 今後は、日本の学協会からの情報発信も重要

## Radiation Exposure During Commercial Airline Flights

Q1: What radiation doses do people receive from flying commercially?

Q2: We plan to bring our 15-month-old grandson to Sicily for vacation, flying a commercial airline from the Philippines. Will the radiation while flying during our 12-hour trip plus the return flight be dangerous to his health?

Q3: I work in the airline industry as a crew member and want to know if there is a way to find out what my radiation exposure might be?

Q4: I understand that the radiation dose while flying diminishes as you get closer to the equator. Is this true?

Q5: Have there been studies of long-term, low-level exposure to radiation during commercial flights and the effects for flight crew?

Q6: For pilots flying below 6,000 feet for 200 hours a year is there any danger from cosmic radiation?

Q7: Is there any specific limit for air travel for children?

*This page last updated November 19, 2004.*

## 今後の検討課題

- ・被ばく管理の必要性(基準値の設定など)
- ・被ばく管理が必要と判断された場合、その方策(線量評価手法の吟味、診断実施の是非等を含む)