# 航空飛行および有人宇宙活動における放射線防護

## Radiological Protection in Aviation and Space

保田浩志 (広島大学)
Hiroshi Yasuda (Hiroshima Univ.)

# お話する内容
Contents

1. 放射線防護とは
   What is ‘radiological protection’?

2. 宇宙放射線による被ばくの管理
   Management of cosmic radiation exposure

3. 太陽フレアの影響に対する備え
   Defensive measure against a hazardous solar flare

# 放射線防護とは

What is ‘radiological protection’?

# 放射線防護の目的
Aim of radiological protection

**放射線防護の目的は、確定的影響の発生を防ぎ、確率的影響の発生率を減らすこと.**

The aim of radiological protection is to prevent deterministic effects and to limit the probability of stochastic effects to acceptable levels.

# 放射線に対する生体の応答
## Biological responses to radiation exposure

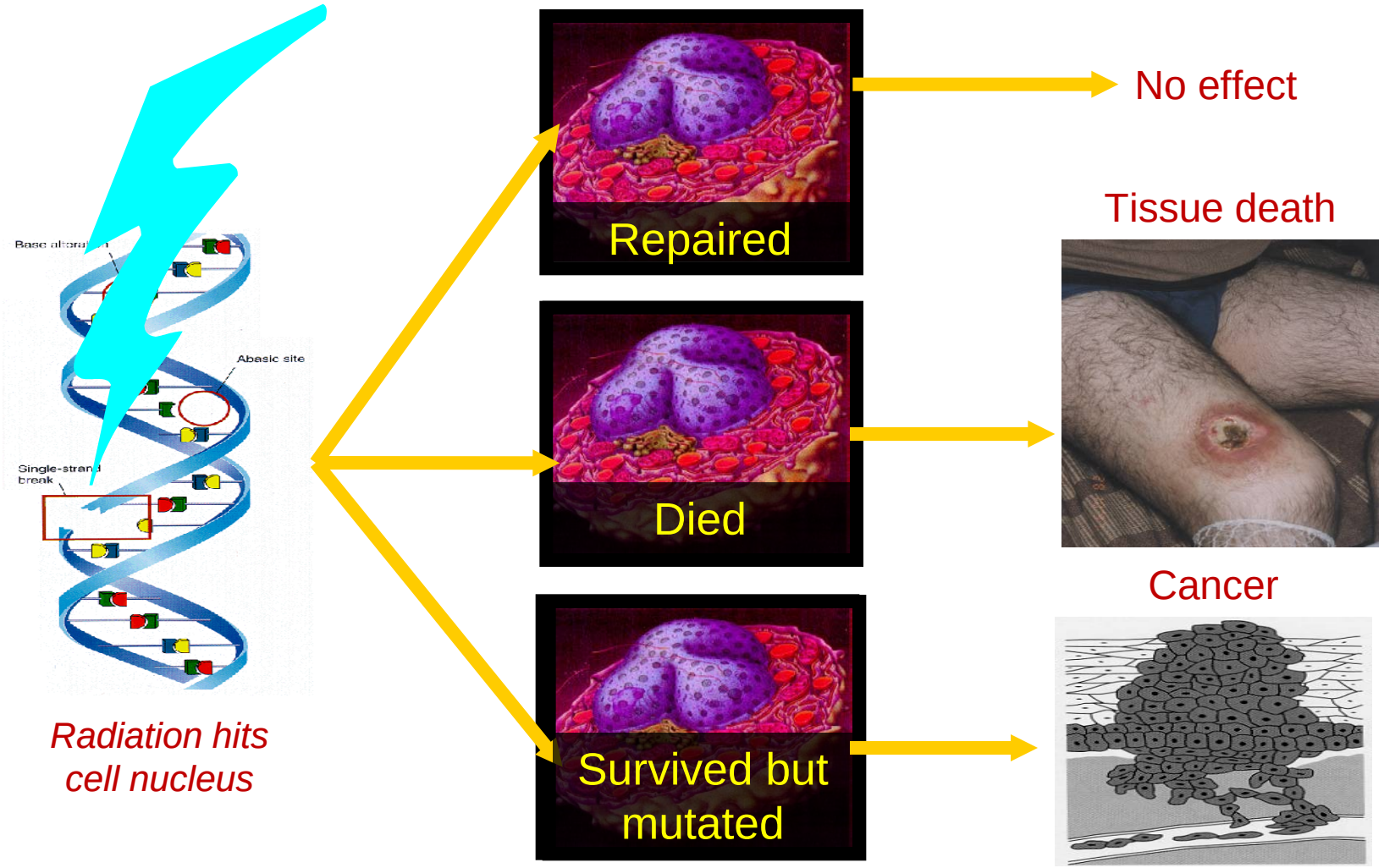


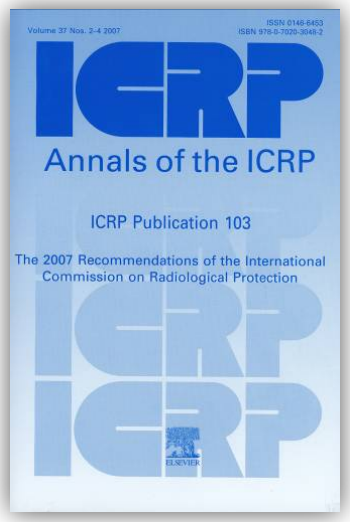

**図. 放射線による生物効果の過程を示す模式図.**
Fig.Schematic illustration on radiation-induced biological responses.

Courtesy of Malcolm Crick

# 放射線の人体影響に係る分類
Classification of radiation health effects

放射線が人体に及ぼす健康影響は、大きく以下の２つに分類される:

- しきい値があり、それより低ければ影響が生じない **確定的影響** (deterministic effects)：皮膚の損傷，血液失調症，不妊など;
- しきい値がなく、少ない被ばくでも線量に比例して影響が大きくなるとされる **確率的影響** (stochastic effects)：発がんと遺伝性影響.



# 確定的影響と確率的影響の違い

Difference between deterministic effects and stochastic effects

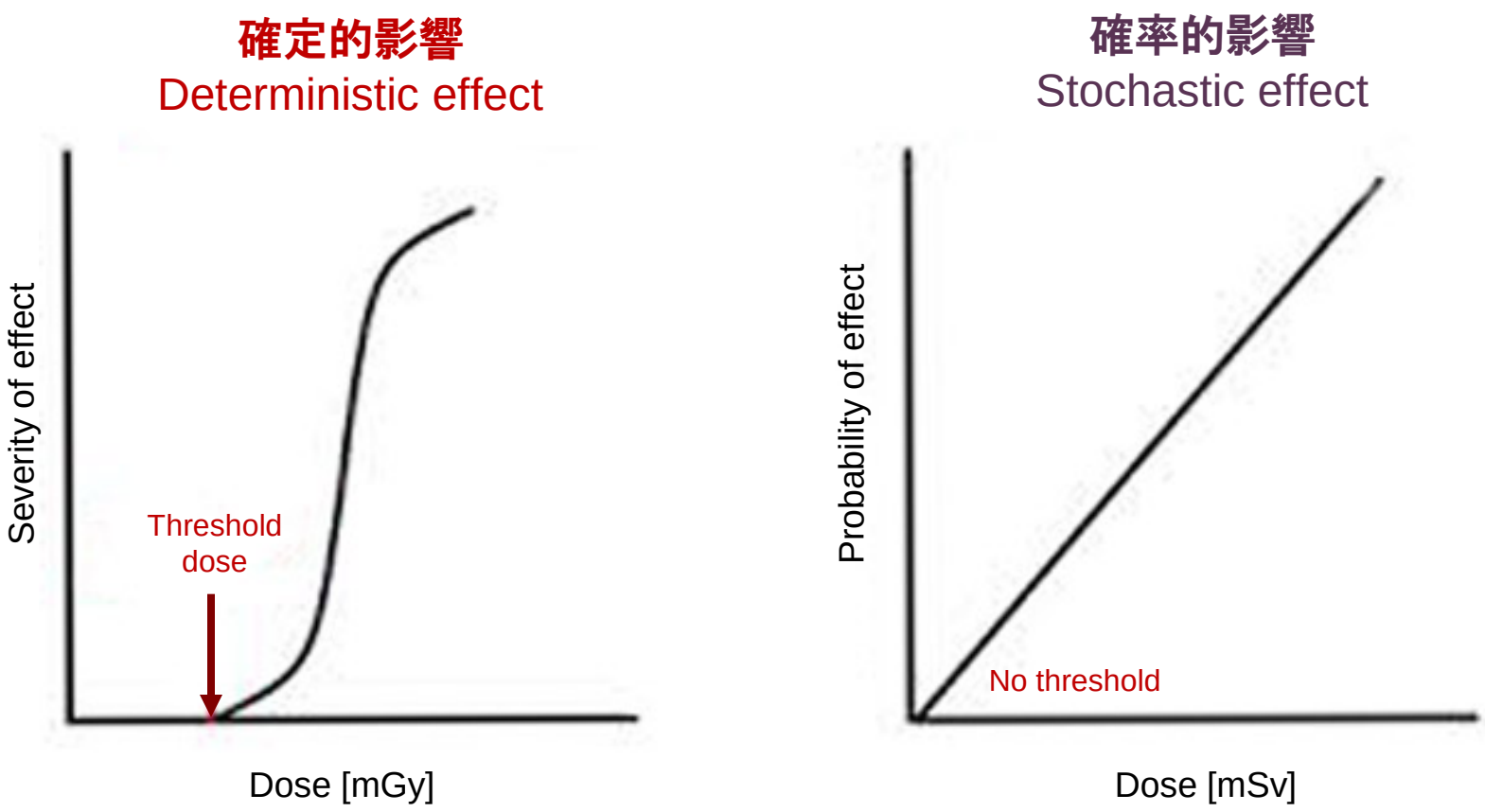



**図. 確定的影響（左）と確率的影響（右）を示す模式図.**

Fig. Diagrams showing a deterministic effect (left) and stochastic effect (right).

# 確定的影響の症状としきい線量

Critical organs & threshold doses of the deterministic effects

**表.全身ガンマ線被ばくで生じる確定的影響のしきい線量** [ICRP, 2007].

Table. Estimated thresholds for whole-body gamma-ray exposure [ICRP, 2007]

| 影響 | 標的臓器・組織 | 症状の発現時期 | 線量（Gy） |
|---|---|---|---|
| **罹病（1%発生率）** | | | |
| 一時不妊 | 睾丸 | ３－９週間 | ～0.1 |
| 永久不妊 | 睾丸 | ３週間 | ～6 |
| 永久不妊 | 卵巣 | ＜１週間 | ～3 |
| 造血系機能低下 | 骨髄 | ３－７日 | ～0.5 |
| 皮膚発赤 | 皮膚（広域） | １－４週間 | ＜ 3～6 |
| 皮膚火傷 | 皮膚（広域） | ２－３週間 | 5～10 |
| 一時脱毛 | 皮膚 | ２－３週間 | ～4 |
| 白内障 | 水晶体 | 数年―数１０年 | ～1.5 |
| **死亡** | | | |
| 骨髄症候群 | 骨髄 | ３０－６０日 | 2～3 |
| 胃腸管症候群<br>治療せず<br>治療する | <br>小腸<br>小腸 | <br>６－９日<br>６－９日 | <br>～6<br>＞6 |
| 間質性肺炎 | 肺 | １－７ヶ月 | ～6 |

# しきい値のない影響 (確率的影響)

Non-threshold health effects (stochastic effects)

がんや遺伝性疾患が発現する確率は被ばくした線量に比例する.

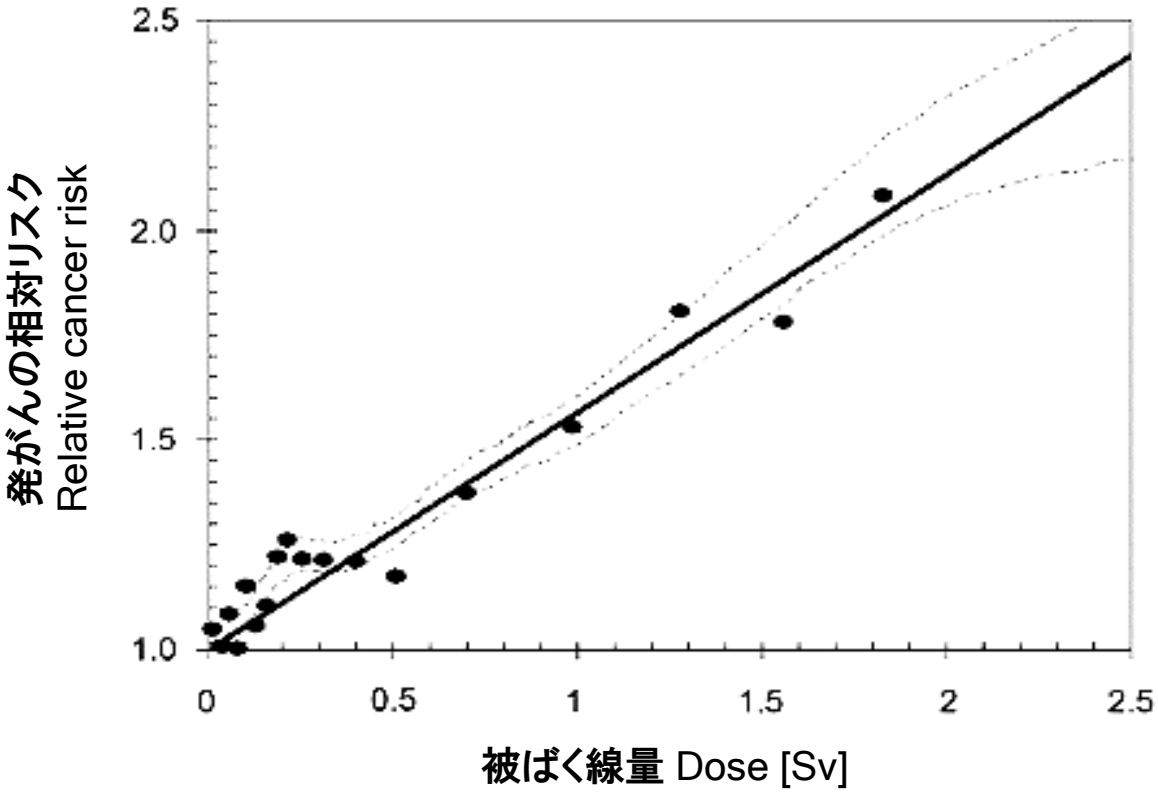



**図. 確率的影響の概念を示すグラフ; 線量に比例して発現確率が増える.**

Fig. Plots of dose .vs. cancer risk; the risk increases linearly with the dose.

Courtesy of RERF

# しきい値のない影響(確率的影響)

Non-threshold health effects (stochastic effects)

がんになる確率は放射線被ばくの量と時期に影響される.

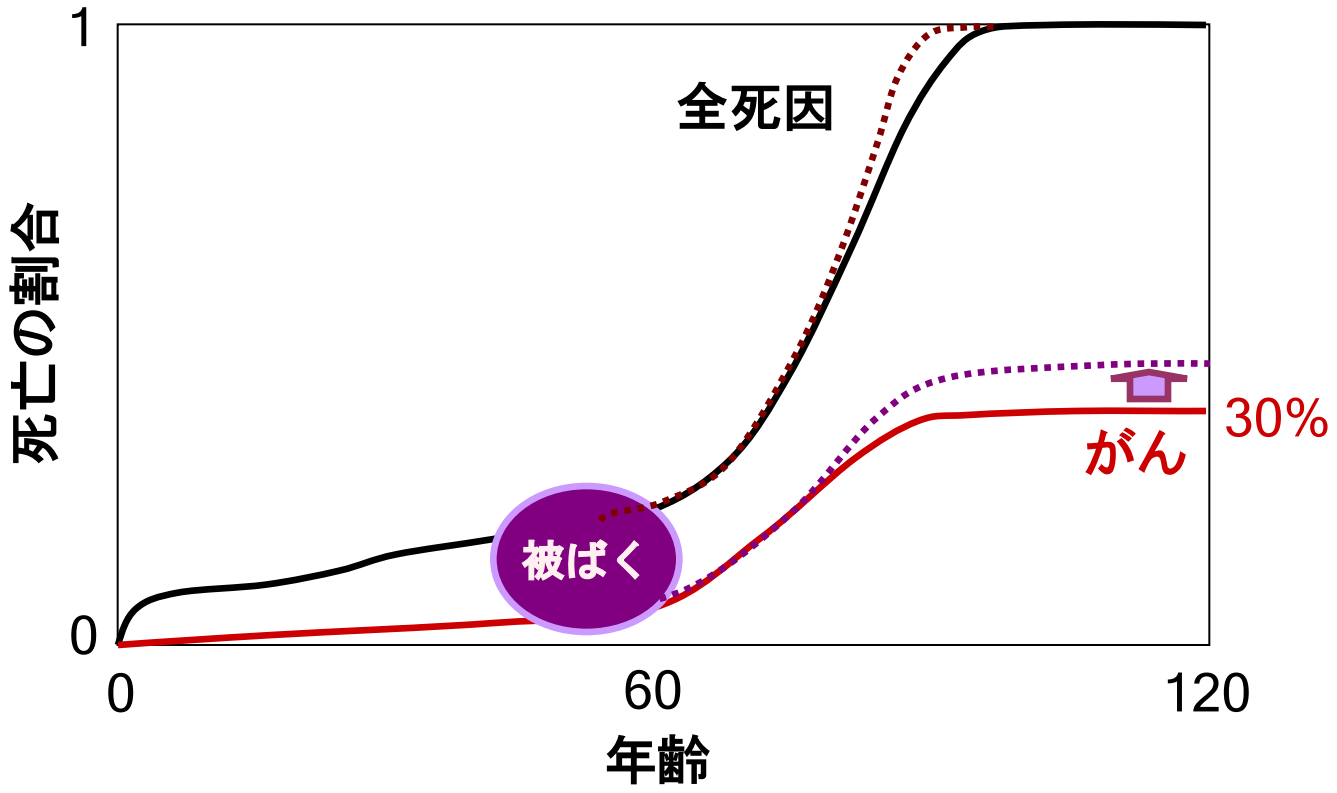



**図. ヒトの年齢と死亡割合の模式的な関係. 放射線被ばくによってがんが誘発され、死亡の直接的な原因としての割合が高まる.**

Fig. Diagram showing the relationship between the mortality and age.

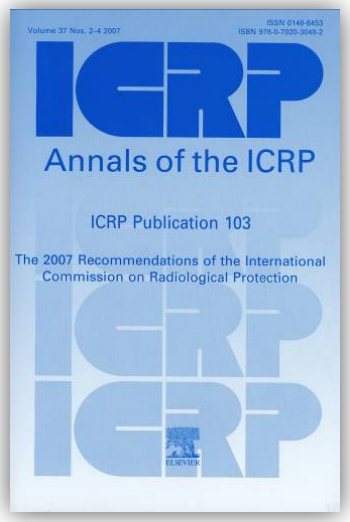
# 放射線被ばくの類型
Types of radiological protection

被ばくのタイプは大きく３つに区分される.

1 **職業被ばく** (Occupational exposure)
放射線や放射性物質を扱う仕事での被ばく.

2 **医療被ばく** (Medical exposure)
患者として診断や治療で受ける被ばく.

3 **公衆被ばく** (Public exposure)
上記以外の被ばく.



# 放射線の線量限度
Radiation dose limits

表.　我が国で定められている個人に対する線量限度.

| 線量 | 職業人 | 一般公衆 |
|---|---|---|
| 実効線量 | 100mSv/5年<br>50mSv/年 | 1 mSv/年 |
| 女子 | 5mSv/3月 | |
| 妊娠中の女子 | 内部被ばくについて<br>1mSv（妊娠期間中） | |
| 等価線量: | | |
| 眼の水晶体 | 150 mSv/年 | - |
| 皮膚 | 500 mSv/年 | - |
| 妊娠中の女子の腹部表面 | 2mSv（妊娠期間中） | - |

# 宇宙放射線による被ばくとその管理

Radiation exposure to cosmic radiation and management of the exposure

# 地上における宇宙放射線被ばく
Cosmic radiation exposure on ground

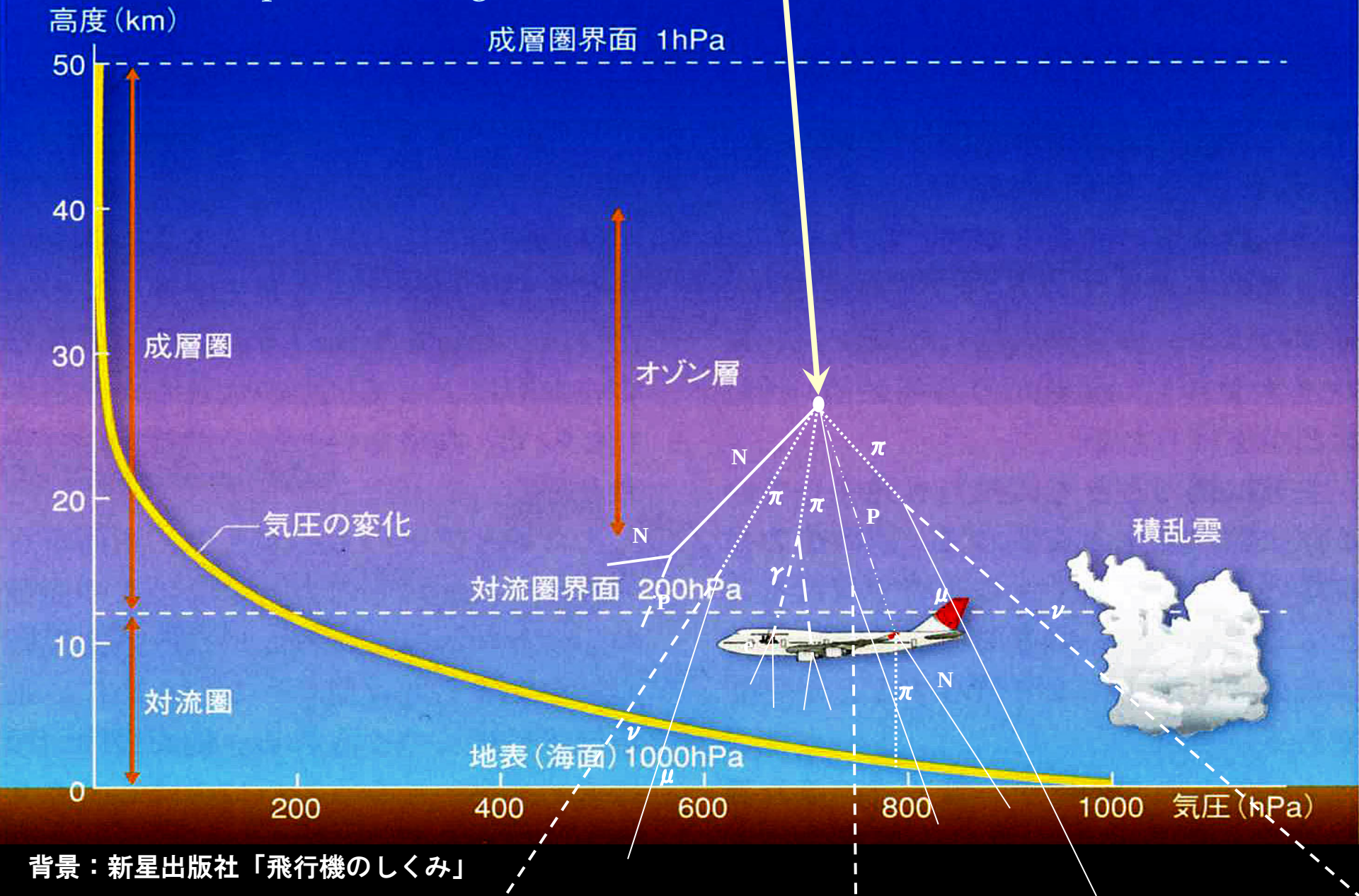
**地上における宇宙線による被ばくは放射線防護の対象とみなされない.**

ICRP Publ. 103 (2007) stated:
‘Exposures that may be excluded from radiological protection legislation include uncontrollable exposures and exposures that are essentially not amenable to control…, such as such as exposure to cosmic rays at ground level.’

ICRPの2007年勧告によれば、地上における宇宙放射線による被ばくは、放射線防護に係る規制の対象から除外できる.

# 高高度での被ばく

## Radiation exposure at high altitude




背景：新星出版社「飛行機のしくみ」

# 線量率の高度分布
Dose rate .vs. altitude

**旅客機の巡航高度11km前後での線量率は地上の約百倍.**

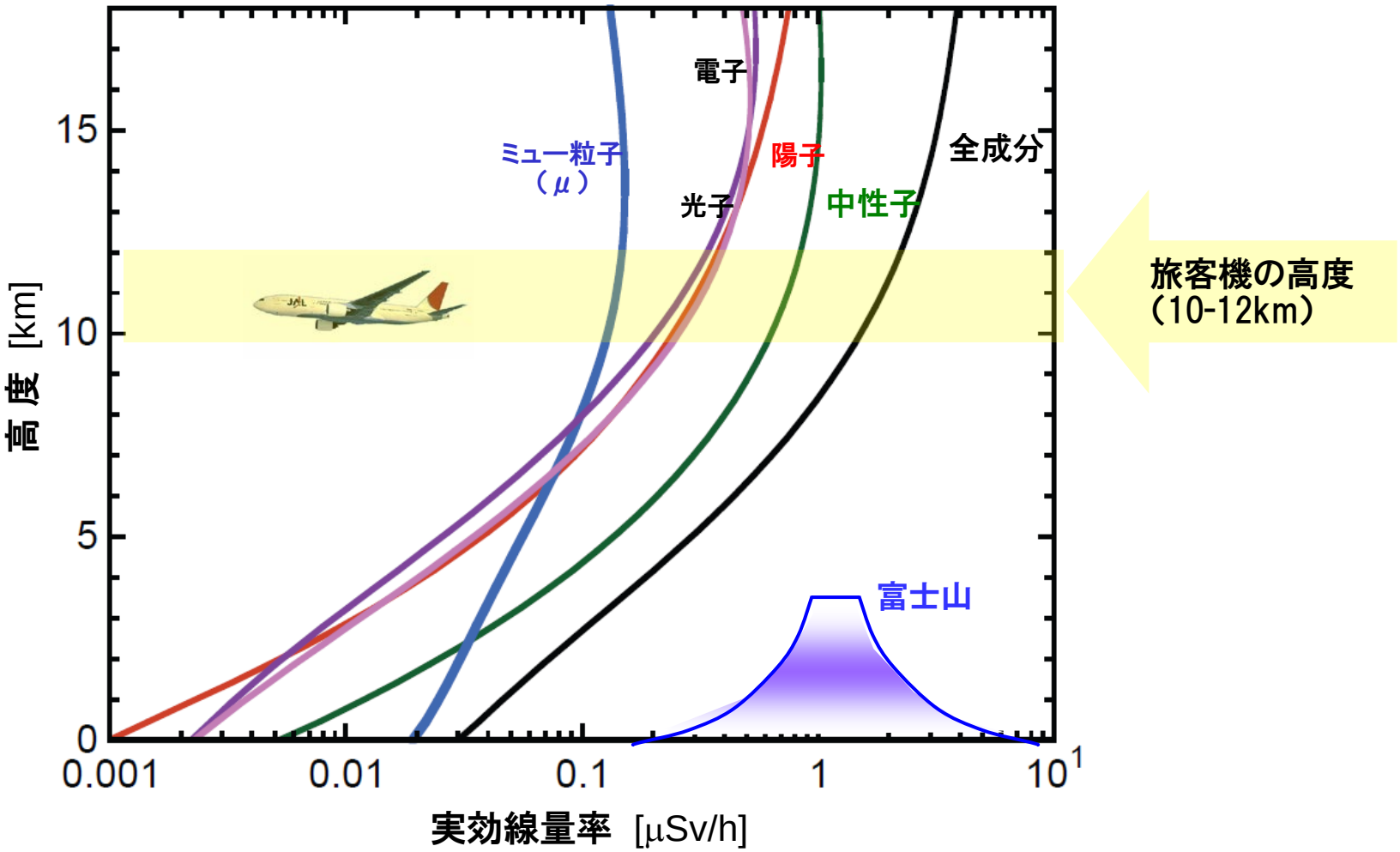



図. 宇宙線成分の実効線量率の高度による変化.

# 日常生活における被ばく

Radiation exposure in daily life

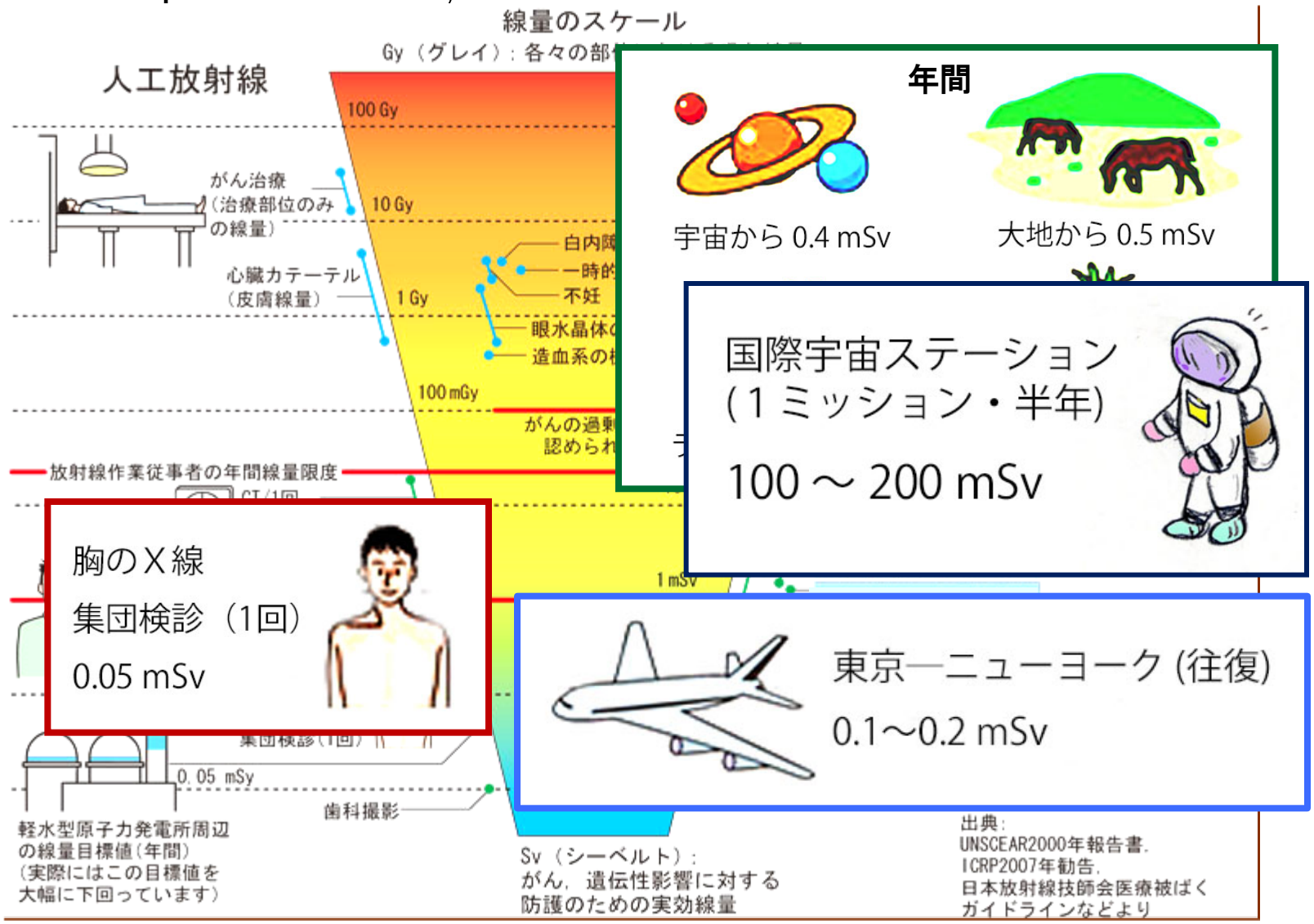



**図.　日常生活で受ける様々な被ばくの線量比較；**
**左が自然放射線源、右が人工放射線源.**

Courtesy of NIRS

# 航空機利用や宇宙飛行での被ばく

Radiation exposure in aviation and space

**上空における宇宙線による被ばくは放射線防護の対象になり得る.**

ICRP Publ. 103 (2007) stated:
‘The Commission recommended that exposures to cosmic radiation be part of occupational exposure in the operation of commercial jet aircraft and space flight.’

ICRPの2007年勧告によれば、民間ジェット機の運用や宇宙飛行における被ばくは職業被ばくとして扱うべきである.

# 航空被ばく管理に関する動向(1/2)

Trends on management of radiation exposure in aviation

EU Council Directive 96/29/EURATOM

欧州連合(EU)理事会は、航空機乗務員の被ばくに関するアセスメントや妊娠した女性乗務員に対する1mSvの線量限度の適用等を加盟国に求める指令を1996年に発令.

→　現在、すべての加盟国が当該指令に適合(年間6mSvを基準値とする法令やガイドライン等を策定).

# 航空被ばく管理に関する動向(2/2)

Trends on management of radiation exposure in aviation

ワーキンググループの報告を基に、**放射線審議会**は、年間 5mSvを管理目標値として自主管理を行うこと等を求めるガイドラインを策定.

→2006年5月、関連する3つの省（文部科学省／国土交通省／厚生労働省）は担当局合同で、**ガイドライン**に沿った措置を講じるよう国内航空会社に対して通達; 翌年度から国際便を持つ本邦航空会社で被ばく管理が開始された.

# 放射線の線量限度
Radiation dose limits

表. 我が国で定められている個人に対する線量限度.

| 線量 | 職業人 | 一般公衆 |
|---|---|---|
| 実効線量 | 100mSv/5年<br>50mSv/年 | 1 mSv/年 |
| 女子 | 5mSv/3月 | |
| 妊娠中の女子 | 内部被ばくについて<br>1mSv（妊娠期間中） | |
| 等価線量: | | |
| 眼の水晶体 | 150 mSv/年 | |
| 皮膚 | 500 mSv/年 | |
| 妊娠中の女子の腹部表面 | 2mSv（妊娠期間中） | |

年5mSvという基準値は、公衆の線量限度の5倍、職業人の限度の4分の1である.

# 航空機乗務員の被ばく線量

Radiation exposure of aircraft crew

○航空機乗務員の被ばく線量評価、管理について

被ばく線量評価、管理については、19年度より開始。線量評価については、路線ごとに一定期間内の代表的な飛行デー基づき、当該期間内のすべての便について計算コードに年度における線量データについては、下記表の通りであに基づいて設定された管理目標値（年間5mSv）以下であった。

管理目標値
(5mSv)以下

航空機乗務員の被ばく線量

| | | 人数(名) | 平均線量(mSv) | 最大線量(mSv) |
|---|---|---|---|---|
| 定期航空協会加盟会社(国内線のみを運航している会社を除く) | 運航乗務員 | 5,851 | 1.68 | 3.79 |
| | 客室乗務員 | 12,219 | 2.15 | 4.24 |

また、被ばく線量の管理について、各個人ごとに記録、保存及び閲覧ができる体制が構築され、運用されているところ。

▲ 第107回放射線審議会（2008年10月30日)資料より抜粋.

# 宇宙飛行士の被ばく管理
Radiation management of astronauts

周辺線量の測定を行うための
能動型測定器 (TEPC & IC)

飛行士の個人線量を測るための
受動型線量計(TLD & CR39)

Photo：http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images

# 過去の宇宙飛行における被ばく
Radiation doses in past space missions

表. 過去(1999年まで)にNASAが実施した有人宇宙飛行プログラムにおいて、飛行士が受けたと推定される造血器(深さ5cm位置の赤色骨髄)の線量率.

| プログラム名 | 軌道傾斜角 [°] | 周回高度 [km] | 吸収線量率 [mGy $d^{-1}$] | 線量当量率 [mSv $d^{-1}$] |
|---|---|---|---|---|
| マーキュリー | - | - | 0.3 | 0.55 |
| ジェミニ | - | - | 0.49 | 0.87 |
| アポロ | - | - | 0.43 | 1.2 |
| スカイラブ | 50 | 430 | 0.71 | 1.4 |
| シャトル | 28.5 | <400 | [illegible] | 0.18 |
| シャトル | 28.5 | >400 | 1.2 | 2.1 |
| シャトル | >50 | <400 | 0.2 | 0.45 |
| シャトル | >50 | >400 | 0.44 | 1.1 |
| シャトルーミール | 51.6 | ~390 | 0.37 | 0.84 |

1日あたり
0.2～2mSv

注)上表に示した線量当量値は、体表面に設置された個人線量計(TLD)で得られた測定値等を基に、モデル計算によって推定された値である.

# 宇宙飛行士の被ばく
Radiation exposure of astronauts

**宇宙飛行士が受ける被ばくは特別なケースとして取扱う.**

ICRP Publ. 2013 stated below on the peculiarity of space radiation exposure:
‘Exceptional cases of cosmic radiation exposures, such as exposure in space travel, where doses may be significant and some type of control warranted, should be dealt with separately, taking into account the special type of situations that can give rise to this type of exposure.’

ICRPの2007年勧告によれば、宇宙飛行での被ばくは、特殊な状況として区別して扱う必要がある.

# 日本人宇宙飛行士の管理基準 (実効線量)

Constraints on radiation exposure for astronauts (effective dose)

**表. 国際宇宙ステーション(ISS)に搭乗する日本人宇宙飛行士に対して運用されている生涯実効線量制限値.**

| 初めて宇宙飛行を行った年齢 | 男性 (mSv) | 女性 (mSv) |
|---|---|---|
| 27～29歳 | 600 | 600 |
| 30～34歳 | 900 | 800 |
| 35～39歳 | 1000 | 900 |
| 40歳以上 | 1200 | 1100 |

* 線量制限値は、次の放射線被ばくを合算したものを対象として適用する。

(1) 宇宙飛行による放射線被ばく
(2) 地上における放射線業務による放射線被ばく
(3) 航空機による高々度飛行訓練における放射線被ばく
(4) ISS搭乗宇宙飛行士に特有の医学検査による放射線被ばく

# 太陽フレアの影響に対する備え

Defensive measures against a hazardous solar flare

# 大規模太陽フレアへの懸念
Concerns about a large-scale solar flare

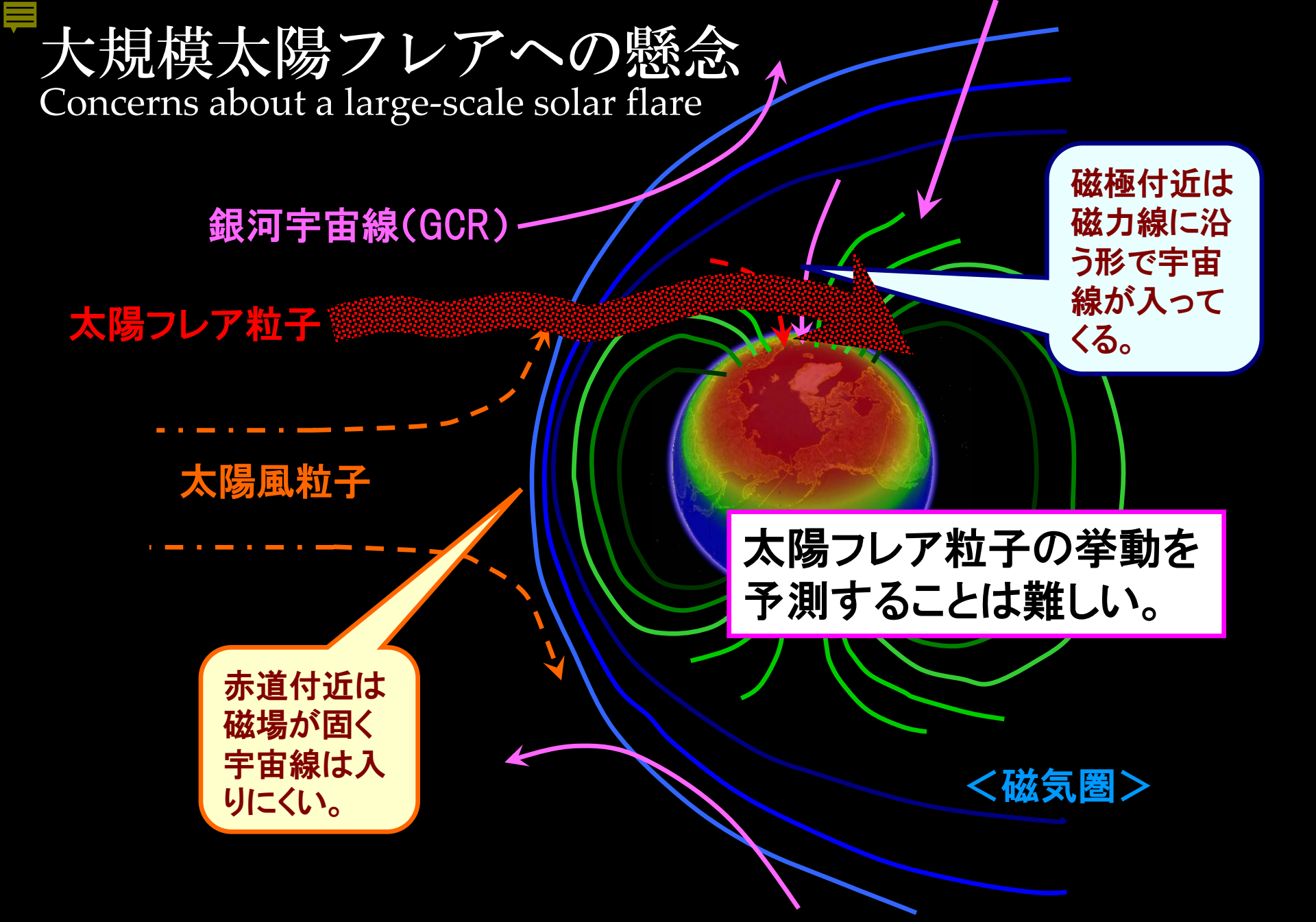
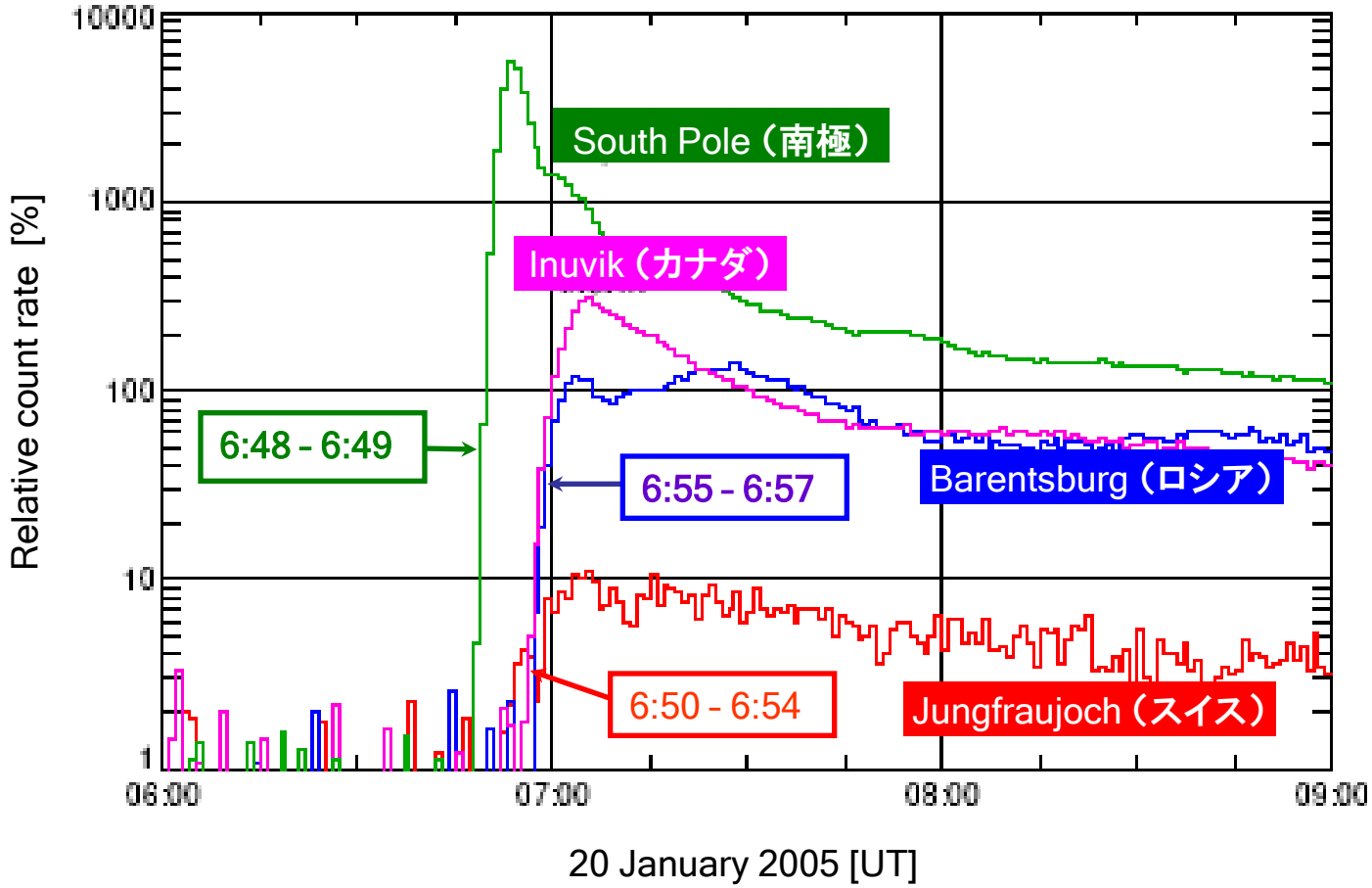



図. 地球周辺の磁場環境（イメージ）.

# 太陽フレアに伴う被ばく線量の上昇

Increase of dose rate because of a solar flare

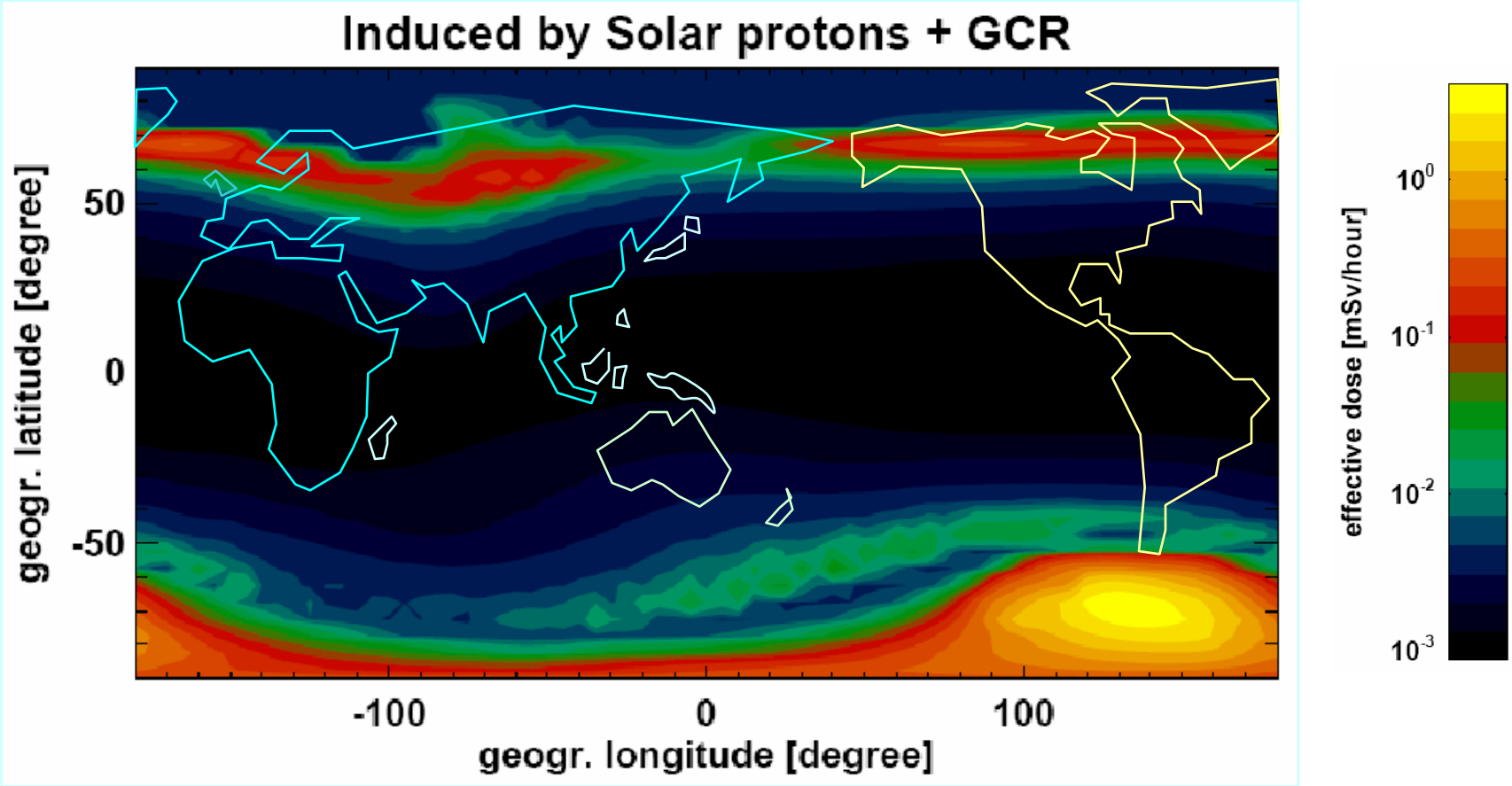



**図．2005年1月20日の太陽フレア発生時における世界各地の中性子モニタの観測データ．立ち上がり時刻の場所によるずれは数分．**

Courtesy of Prof. Erwin Flueckiger

# 航空機高度での被ばく線量の上昇

Increase of dose rate at aviation altitude




**図．** 2005年1月20日の太陽フレア発生時における航空機高度（300g $cm^{-2}$）での宇宙線実効線量率の推定最大値分布（Bütikofer et al., 2007）.

Courtesy of Prof. Erwin O. Flückiger and Prof. Rolf Bütikofer

# 宇宙船内における被ばく線量の上昇

Increase of radiation dose in a spacecraft

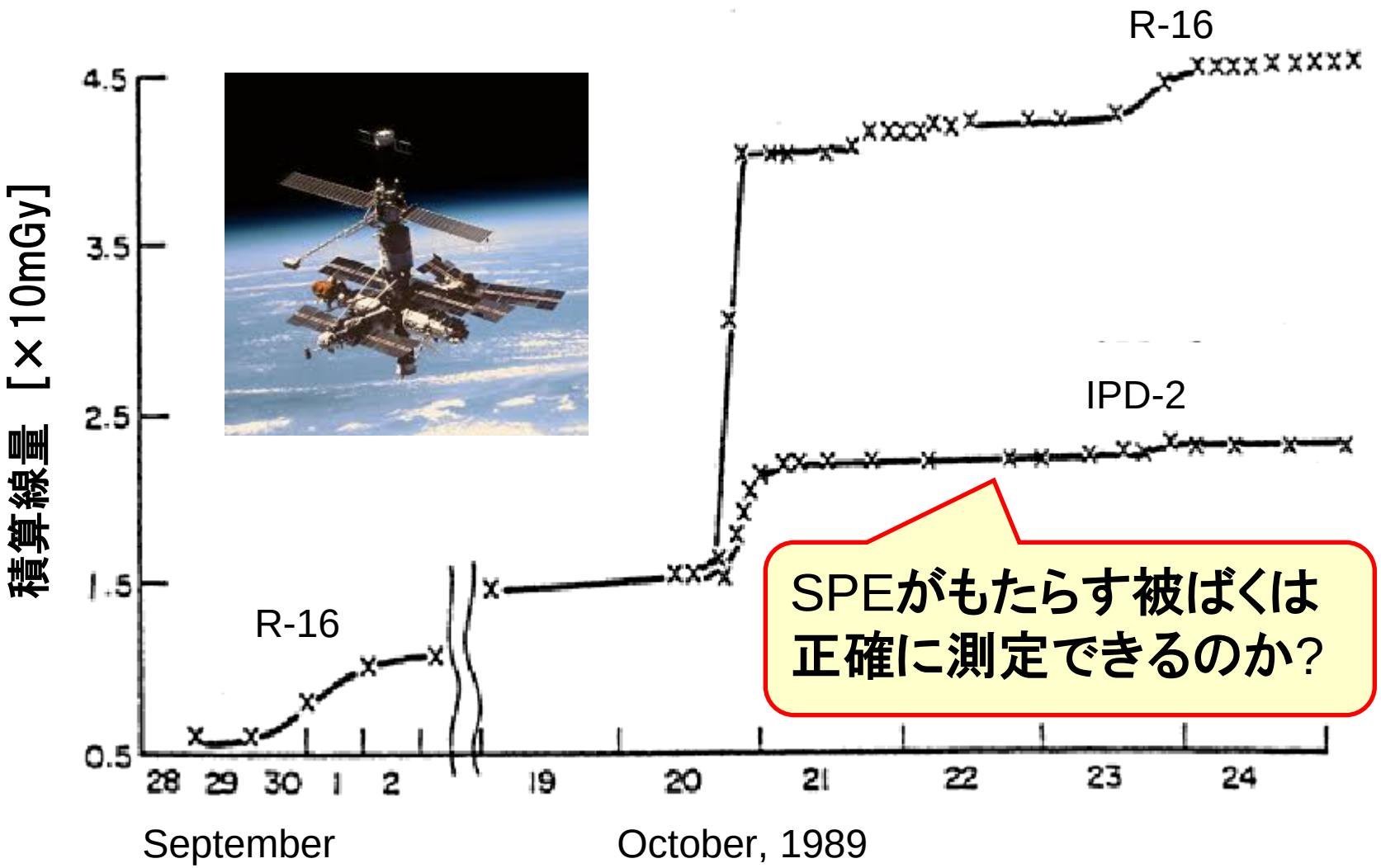



**図.** 1989年10月の太陽フレアの発生時にロシア・宇宙ステーションMIRで観測された積算線量の急激な上昇.

courtesy of S. Yabe, JAXA

# 国際宇宙ステーションでの被ばく
Radiation exposure in ISS

**表. 国際宇宙ステーション(ISS)に滞在する飛行士が太陽の静穏時及び1972年8月規模のフレア発生時に受けると推定される線量値;JAXAによるモデル計算結果.**

| 線量の種類 | 国際宇宙ステーション内での線量 [mSv] | | 船外活動での線量 [mSv] | |
|---|---|---|---|---|
| | 静穏時平均（1日あたり） | 太陽フレア時（1回あたり） | 静穏時平均（1日あたり） | 太陽フレア時（1回あたり） |
| 実効線量 | 0.57 | 5.1 | 1.6 | 27 |
| 骨髄等価線量 | 0.55 | 5.0 | 1.5 | 26 |
| 水晶体等価線量 | 1.2 | 17 | 15 | 190 |
| 皮膚等価線量 | 0.77 | 10 | 6.5 | 150 |
| 精巣等価線量 | 0.61 | 6.1 | 1.8 | 35 |
| 卵巣等価線量 | 0.42 | 2.8 | 0.92 | 9.5 |

Courtesy of JAXA

# 日本宇宙飛行士の管理基準(組織/臓器)

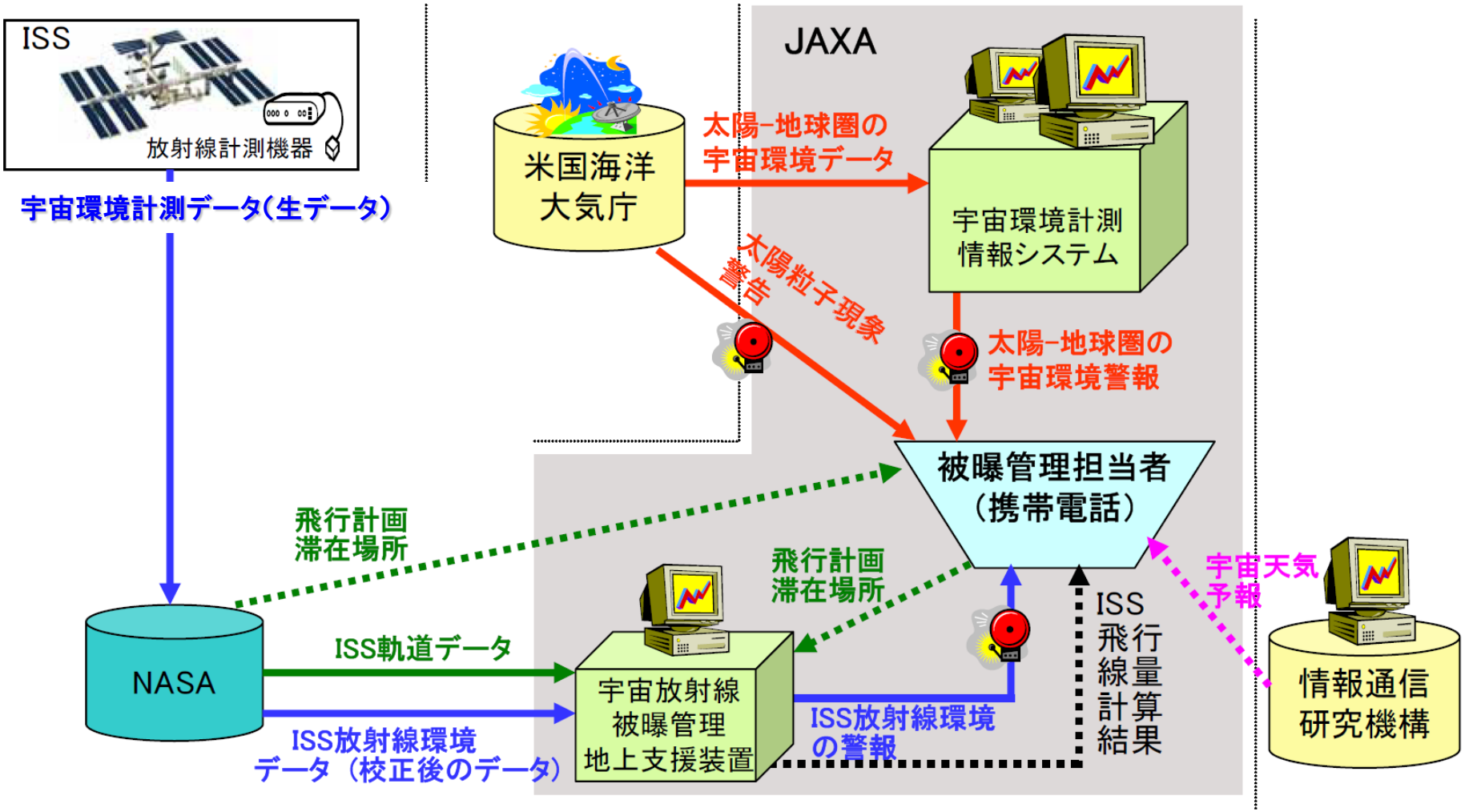
Constraints of radiation exposure for astronauts (tissue/organ)

表. ISS搭乗日本人宇宙飛行士に対して運用されている組織等価線量制限値.

| 組織／臓器 | 1週間 (Sv) | 1年間 (Sv) | 生涯 (Sv) |
|---|---|---|---|
| 骨髄 | – | 0.5 | – |
| 水晶体 | 0.5 | 2 | 5 |
| 皮膚 | 2 | 7 | 20 |
| 精巣 | – | 1 | – |

# ISS宇宙飛行士の被ばく管理体制

System for radiological protection of astronauts



# 民間宇宙旅行の実現
Realization of private space travels

クラブツーリズム・スペースツアーズ
http://www.club-t.com/space/

PDエアロスペース
http://www.pdas.co.jp/

# 民間宇宙旅行への備え

Preparation for the private space travels

http://www.club-t.com/space/

**図. 宇宙旅行の飛行ルート.**

Fig. Flight profile of the space travel.

# 宇宙天気予報の信頼性向上を目指して

For more reliable space weather forecast

**図．科研費新学術領域課題「太陽地球圏環境予測（PSTEP）」のホームページ.**

# より高精度なリアルタイム評価の実現

Realization of more accurate nowcast

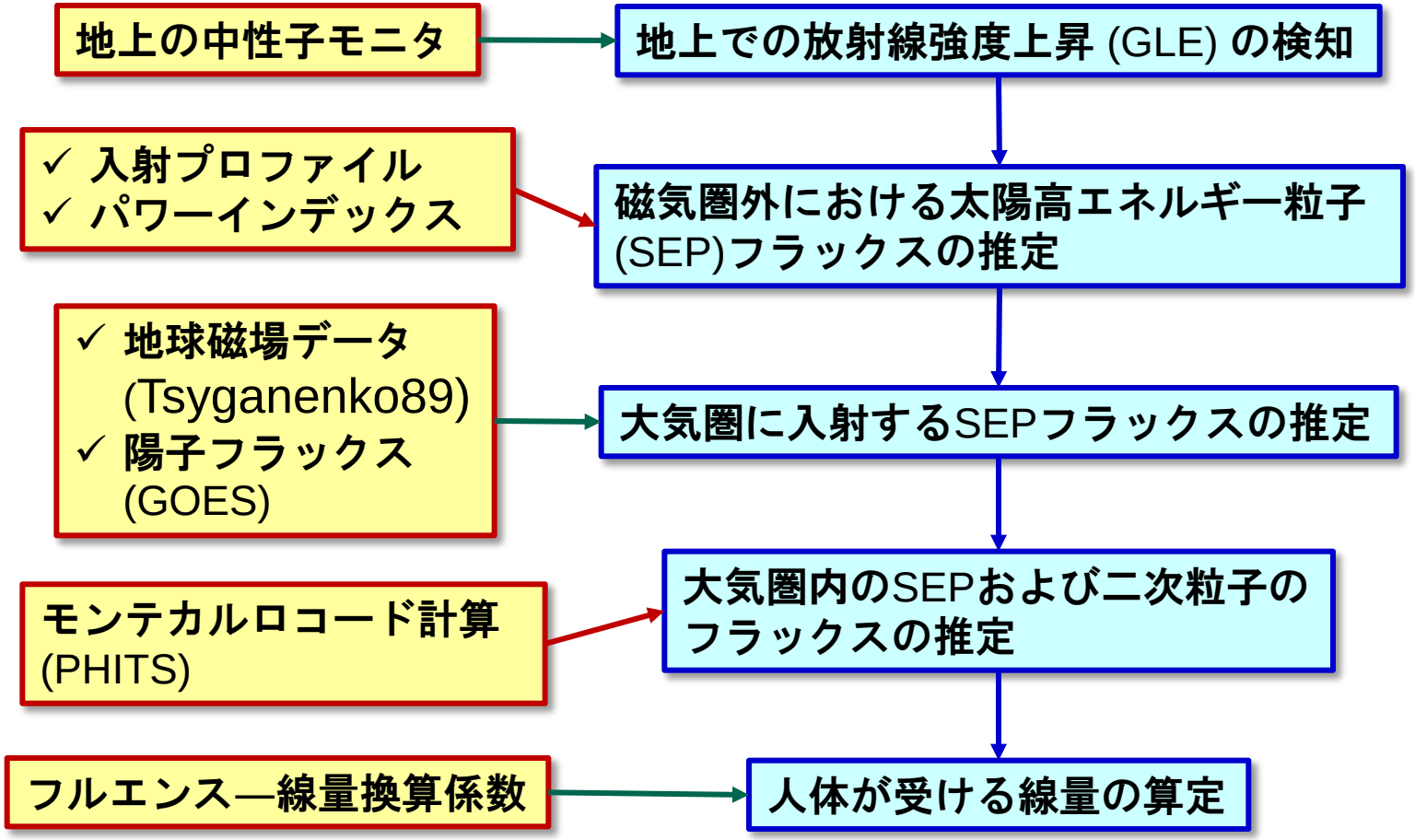



**図. 以前から開発に取り組んでいるSEP対応用航路計算プログラム**:
WASAVIES (WArning System for AVIation Exposure to SEP).

# より迅速かつ正確な予報の実現

For more fast and accurate forecast

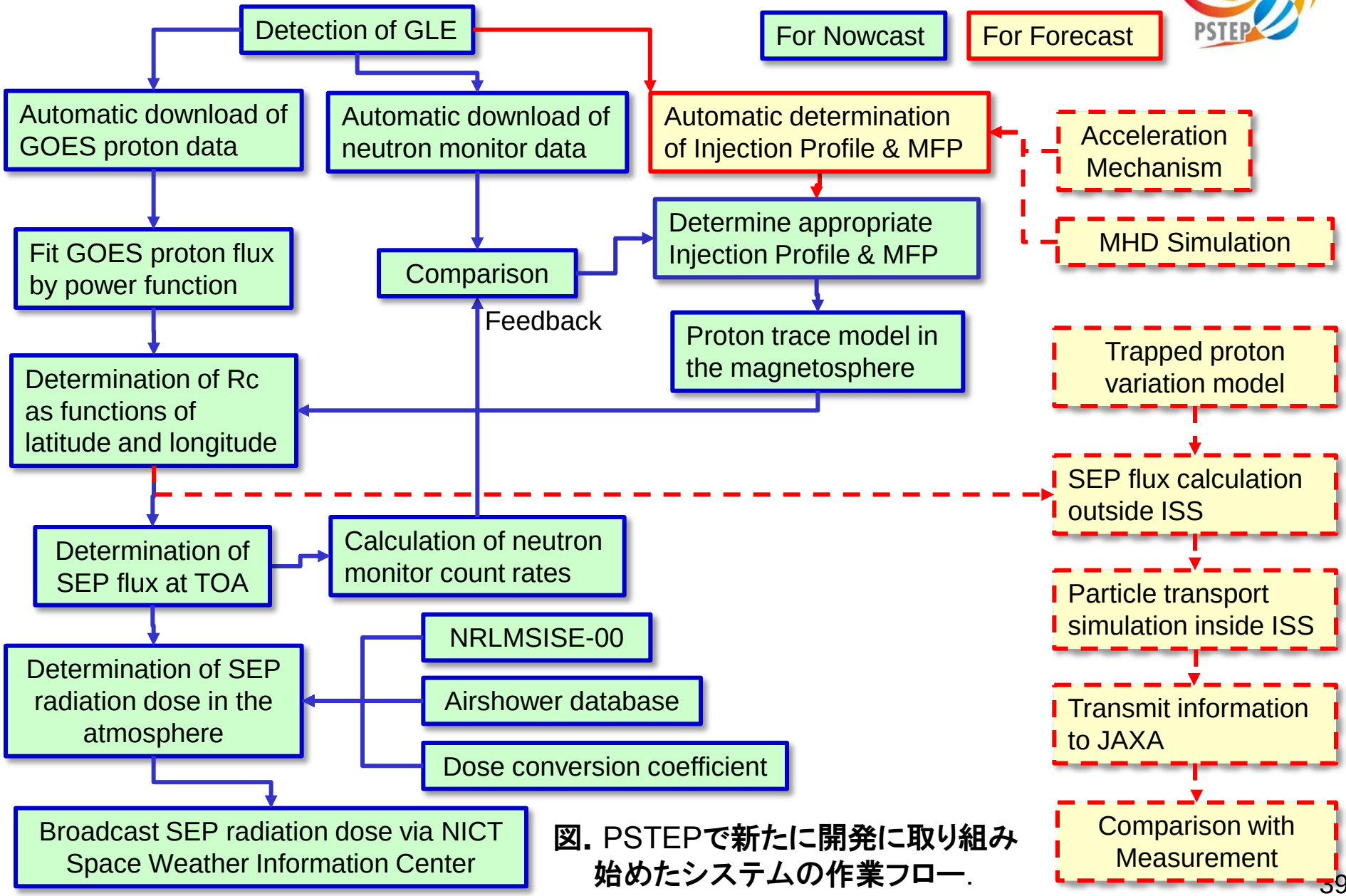



**図.** PSTEPで新たに開発に取り組み始めたシステムの作業フロー.

# リアルタイムの自動データ取得・解析

Automatic data acquisition & analyses in real time

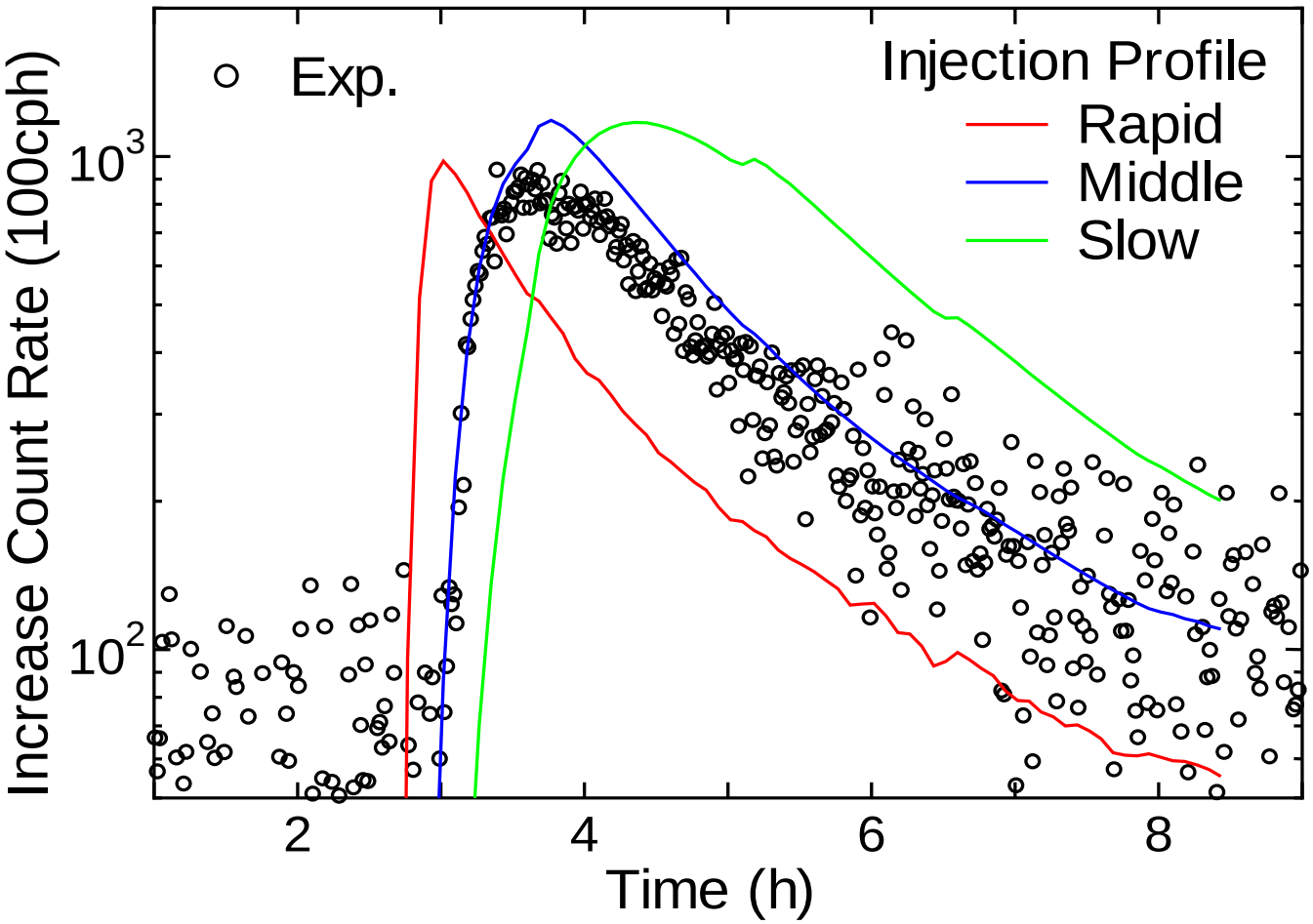



**図.** GLE70発生時における、3つの入射プロファイルの推定値とThuleにある中性子モニタの実測値との比較; こうした比較・解析を自動で行い、最もフィットするプロファイルを決定する.

Courtesy of Tatsuhiko Sato (JAEA)

# このプロジェクトに取り組むメンバー
Members challenging this project

PSTEPにおいて本課題に係る研究開発に取り組んでいる主要メンバー (五十音順):

- 石井守(NICT)
- 片岡龍峰(極地研)
- 久保勇樹(NICT)
- 簑島敬(JAMSTEC)
- 佐藤達彦(原子力機構)
- 塩田大幸(名大)
- 高島健(JAXA)
- 永松愛子(JAXA)
- 三好由純(名大)
- 保田浩志(広島大)、他

# まとめ (1/2)

Summary (1/2)

- 航空機乗務員や宇宙飛行士は、放射線作業者ではないが、職務中に受ける宇宙放射線により比較的高いレベルの被ばくを受ける.
- 航空機乗務員の被ばく線量は、一般に公衆についての線量限度（1mSv/年）を超える. また、国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の被ばくは、放射線作業者の線量限度（50mSv/年かつ100mSv/5年）を上回る場合がある. そこで、独自に定められた基準値により管理している.
- 航空機利用の増大や民間宇宙旅行の実現に伴い、それらを運営する事業者には、乗務員だけでなく乗客の放射線防護にも責任を持つよう求められると予想される.

# まとめ (2/2)

Summary (2/2)

- 乗務員や乗客の安全を確保する上において、太陽高エネルギー粒子 (SEP)やその二次粒子 により、1回のフライトで基準値を超える被ばくを受けるリスクが懸念される.

- そこで、我々のグループでは、太陽高エネルギー粒子による被ばく線量を迅速に計算・予測し、必要に応じて対応を促すシステムの開発に、太陽地球圏環境予測プロジェクト (PSTEP) の一環として取り組んでいる.

# 謝辞
Acknowledgements

本報告で紹介した内容の一部は、以下の組織他に所属する同僚からのご提供又はご協力により得られたものである. 記して深く謝意を表します.

- 新学術領域・宇宙地球圏環境予測（PSTEP）プロジェクト
- 量子放射線科学技術研究開発機構（QST; 旧放射線医学総合研究所 NIRS）
- 日本原子力研究開発機構（JAEA）
- 宇宙航空研究開発機構（JAXA）
- アメリカ航空宇宙局（NASA）
- 定期航空協会