

京都大学宇宙総合研究ユニット 第4回シンポジウム

宇宙で被ばくする放射線の量と そのリスク

保田 浩志

(独) 放射線医学総合研究所

March 5, 2011

本日お話する内容

1. 宇宙での被ばく源
2. 宇宙飛行に伴う被ばく
3. 宇宙線被ばくのリスク
4. 宇宙飛行士の被ばく管理
5. これからの課題

‘被ばく’と書く理由

被爆



被曝

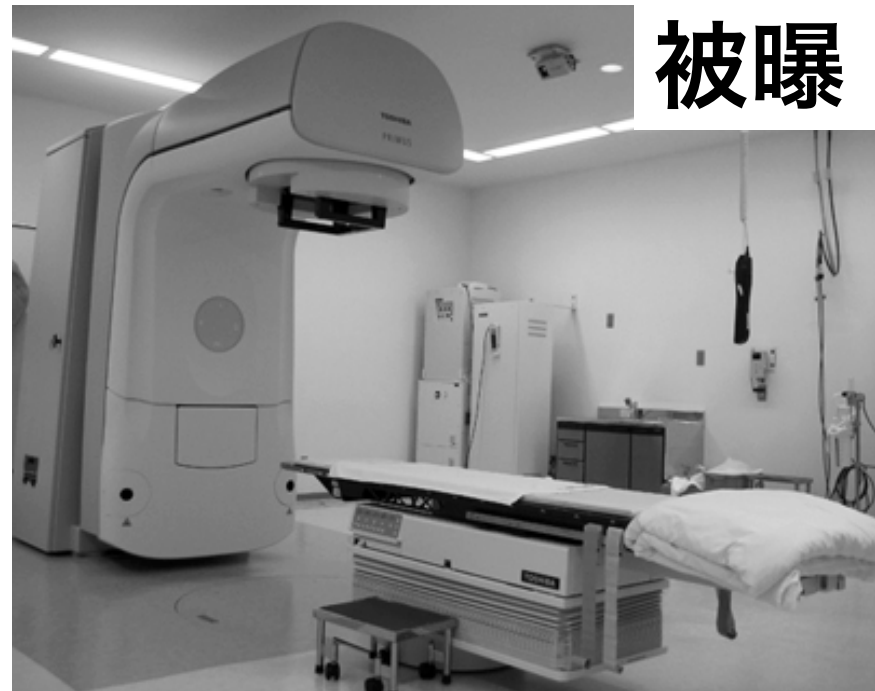
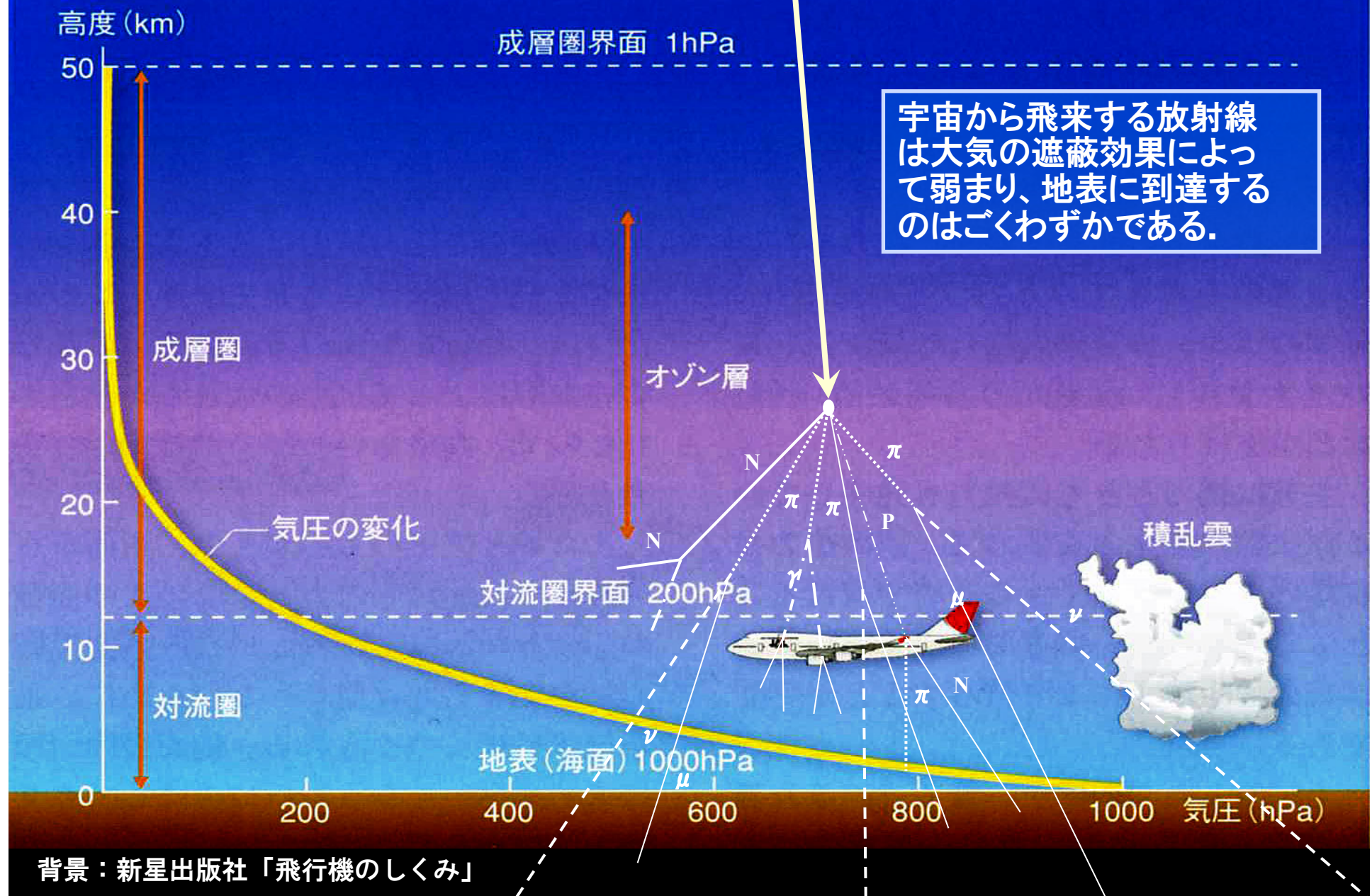


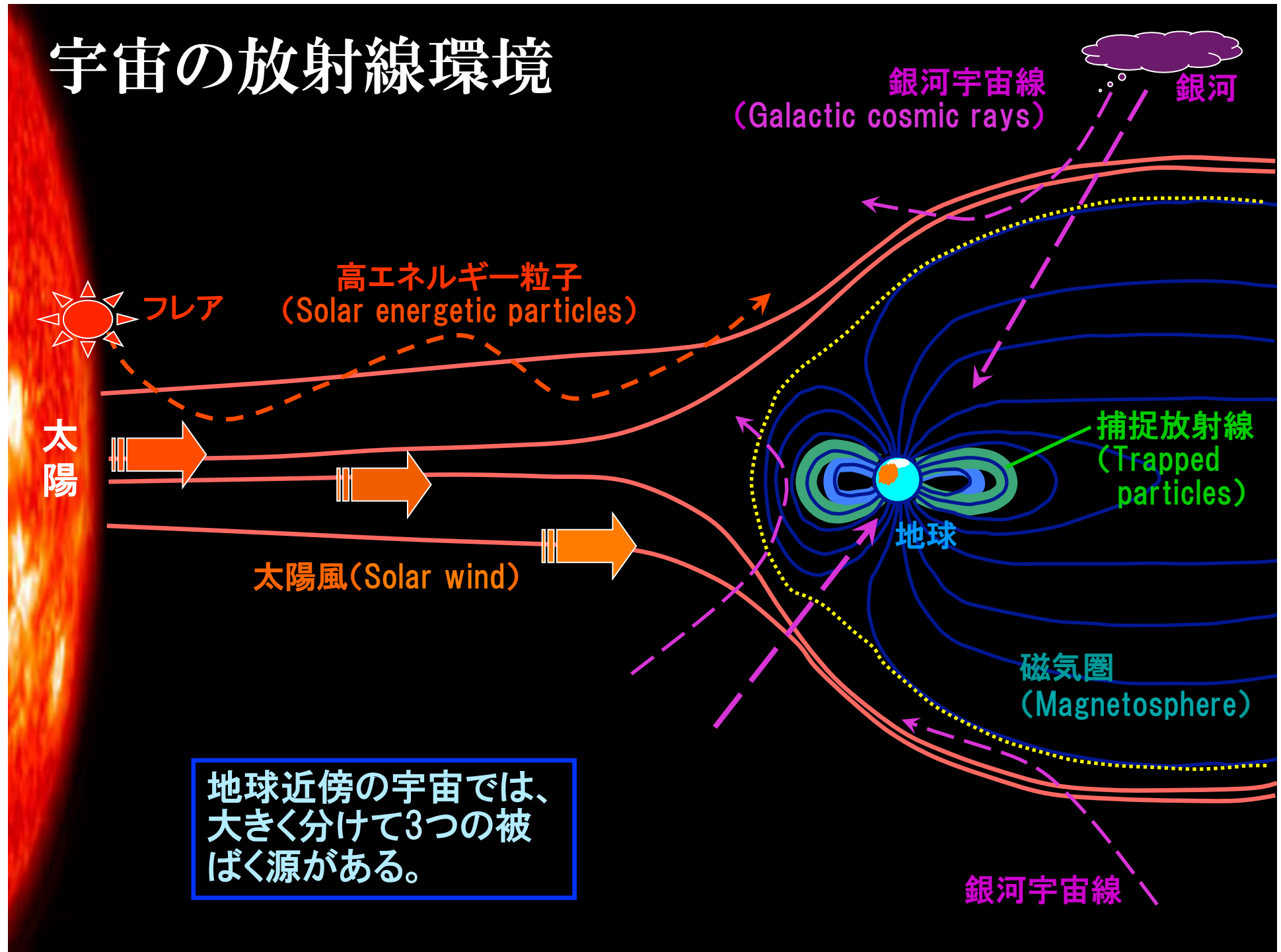
図. 「被爆」と「被曝」の違い.

宇宙での被ばく源

宇宙から飛来する放射線



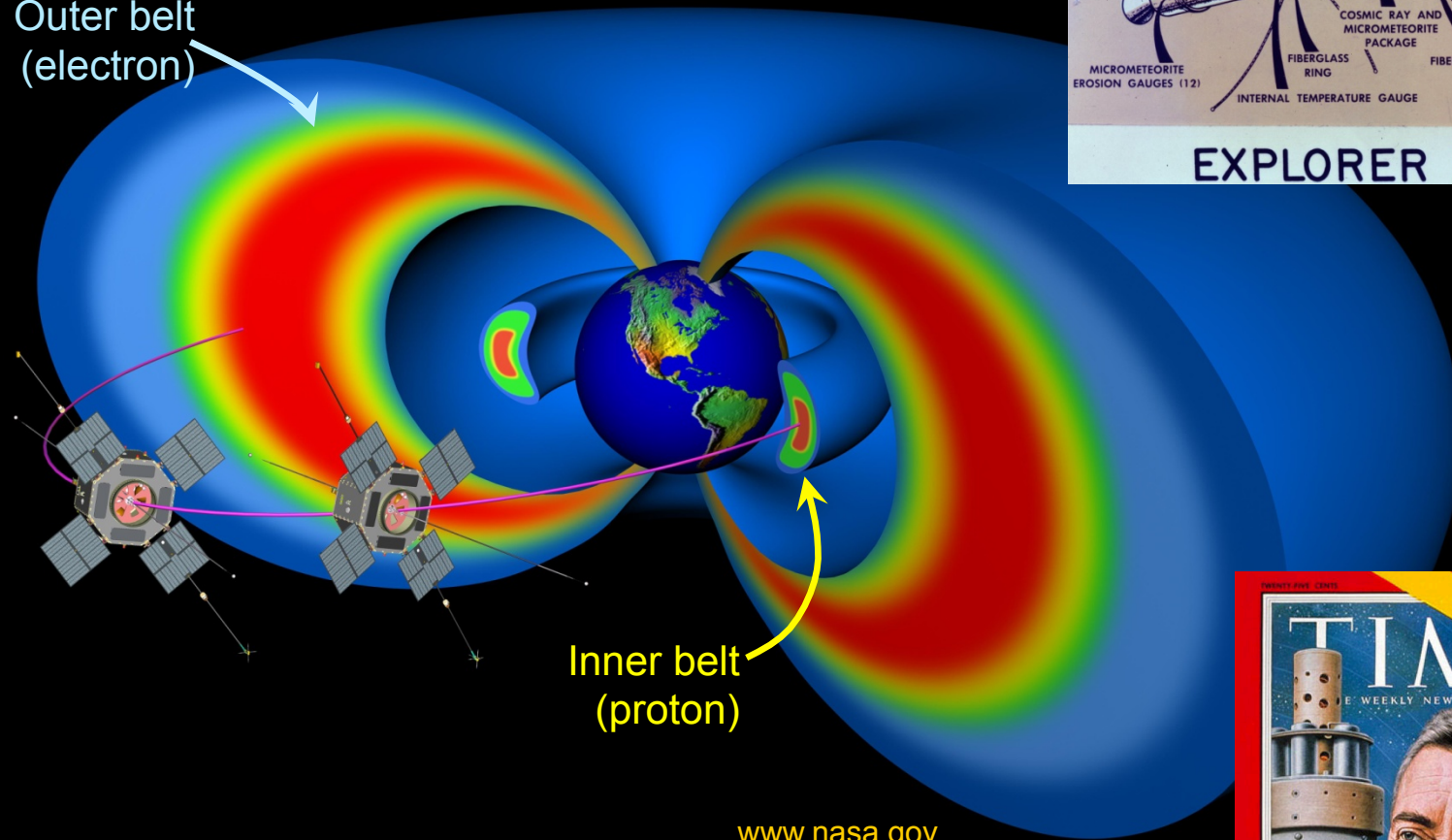
宇宙の放射線環境



地球近傍の宇宙では、
大きく分けて3つの被
ばく源がある。

捕捉放射線帯

Outer belt
(electron)



Inner belt
(proton)

www.nasa.gov

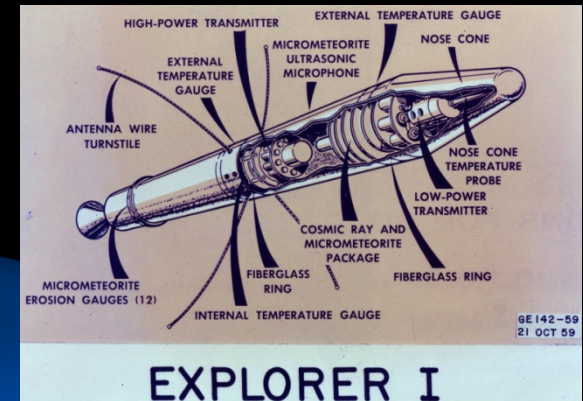


図. 捕捉放射線帯のイメージ(上). 右上は1958年に米国が打ち上げた探査機「Explorer 1」で搭載されたガイガーカウンターで放射線帯の存在を明らかになった. 右下はその計画・実施を担当したVan Allen博士のイラスト.

地球磁場の原因

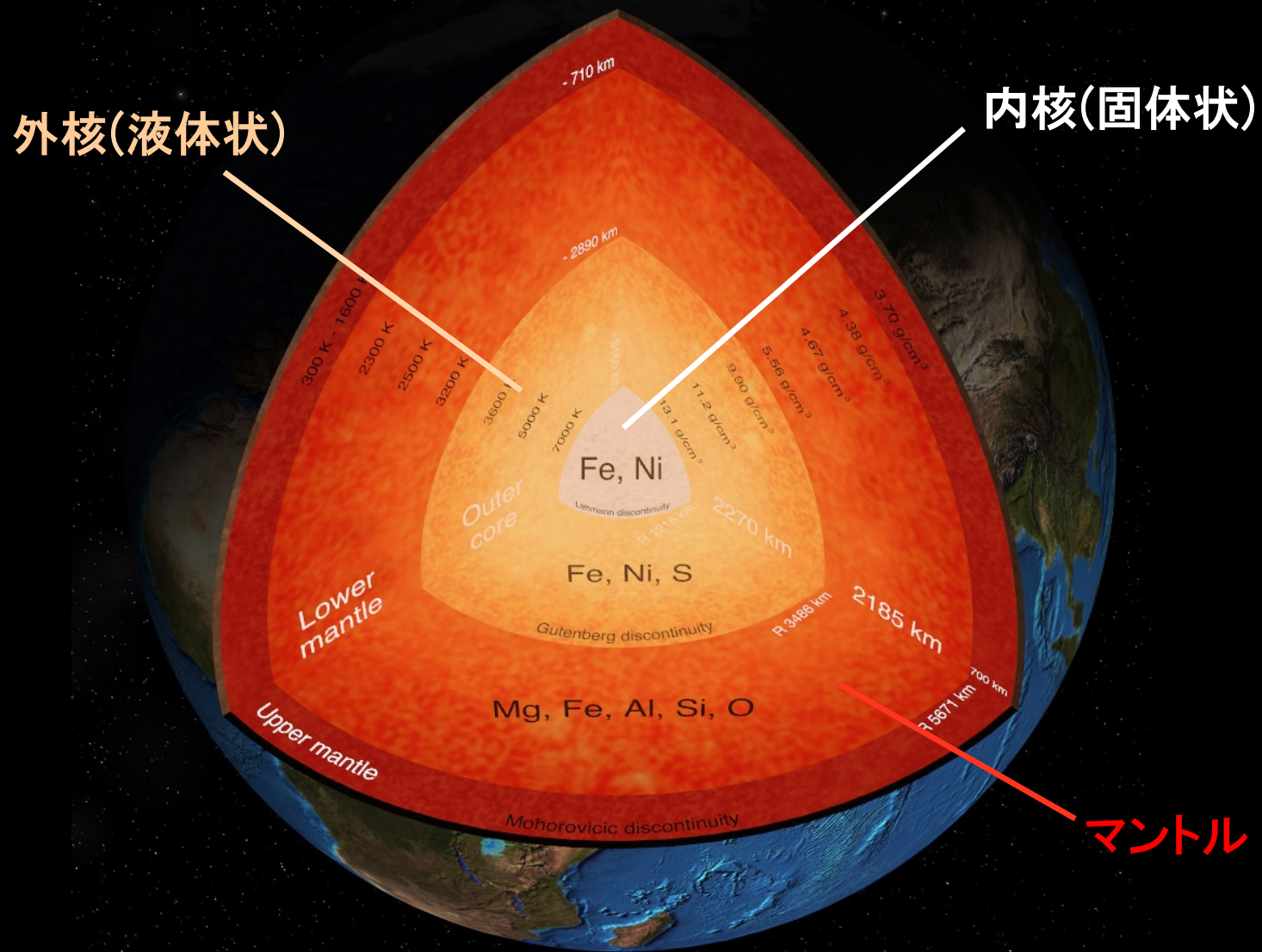
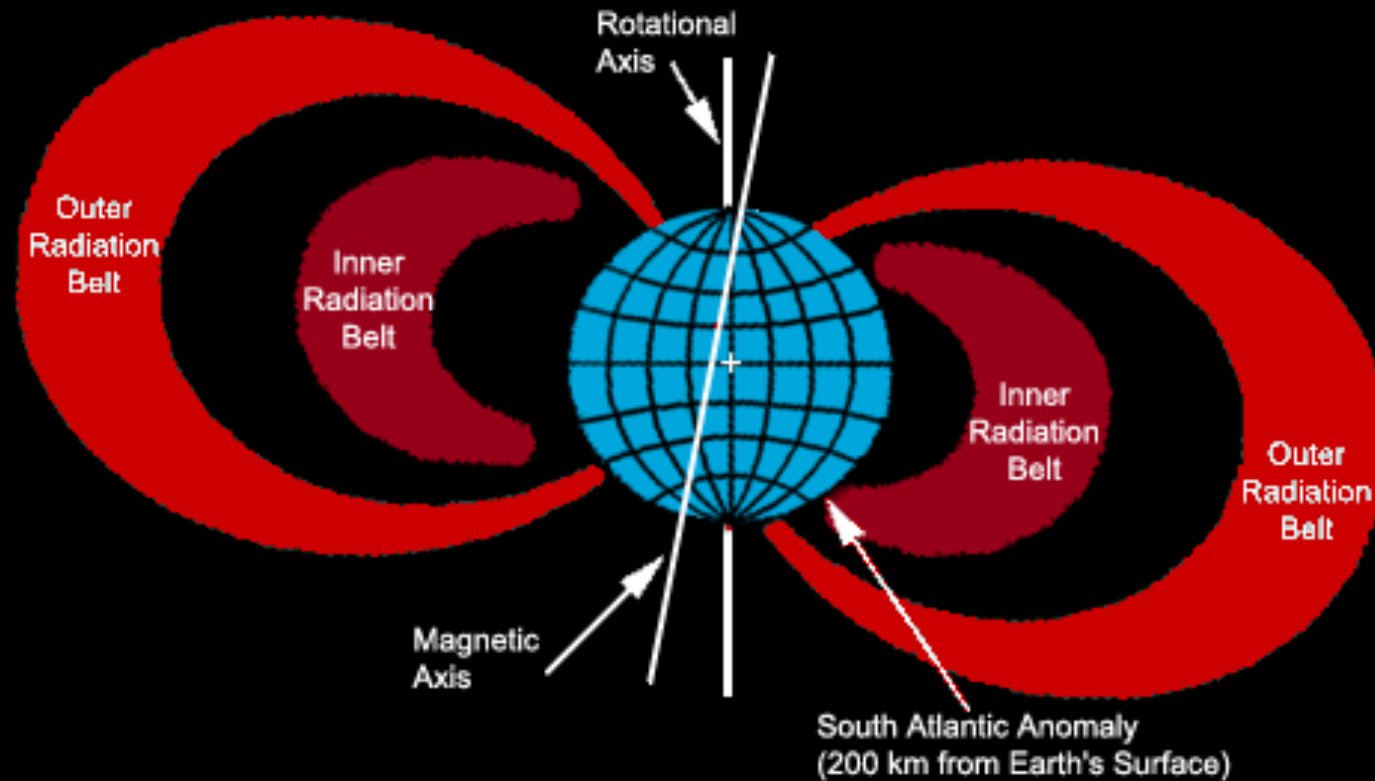


図. 地球内部の構造を示すイラスト; 外核の溶融した鉄などの金属が動くことで電流が流れ磁場が発生すると考えられている(ダイナモ理論).

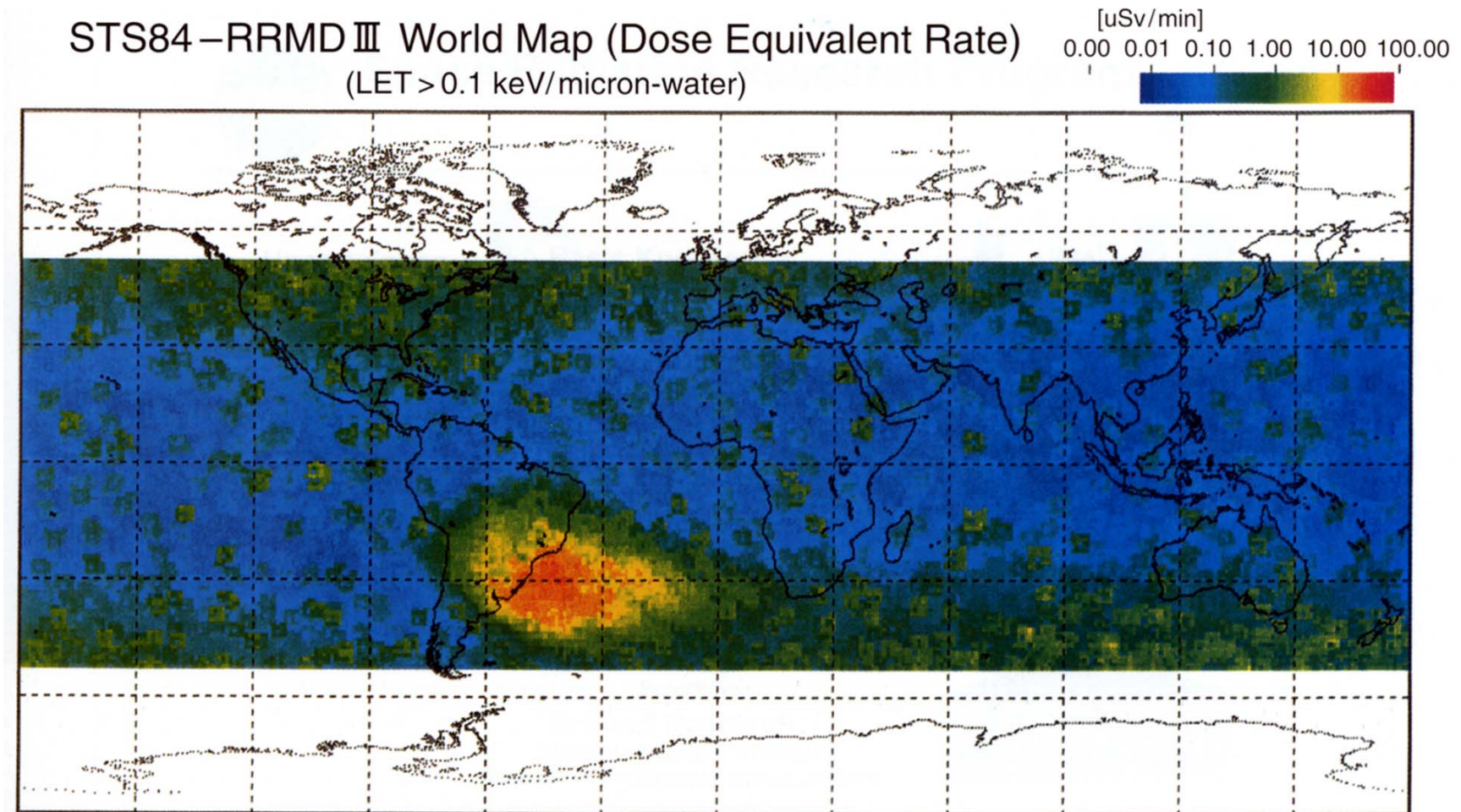
南大西洋異常 (SAA)について



ja.wikipedia.org

図. 捕捉放射線帯の断面のイラスト. 地磁気軸の傾きにより、南大西洋上空では、他では1000km以上の高さにある捕捉放射線帯(内帯)が300~400kmの高さにまで垂れ下がっている.

捕捉放射線帯粒子の影響(荷電粒子)



Geographical map of dose equivalent rate measured during the RRMD-III in STS-84 mission ;

図. シャトルミールミッションでJAXAが開発したSi検出器を用いて測定された線量当量率のグローバル分布(Nakano et al. 2000).

捕捉放射線帯粒子の影響(中性子)

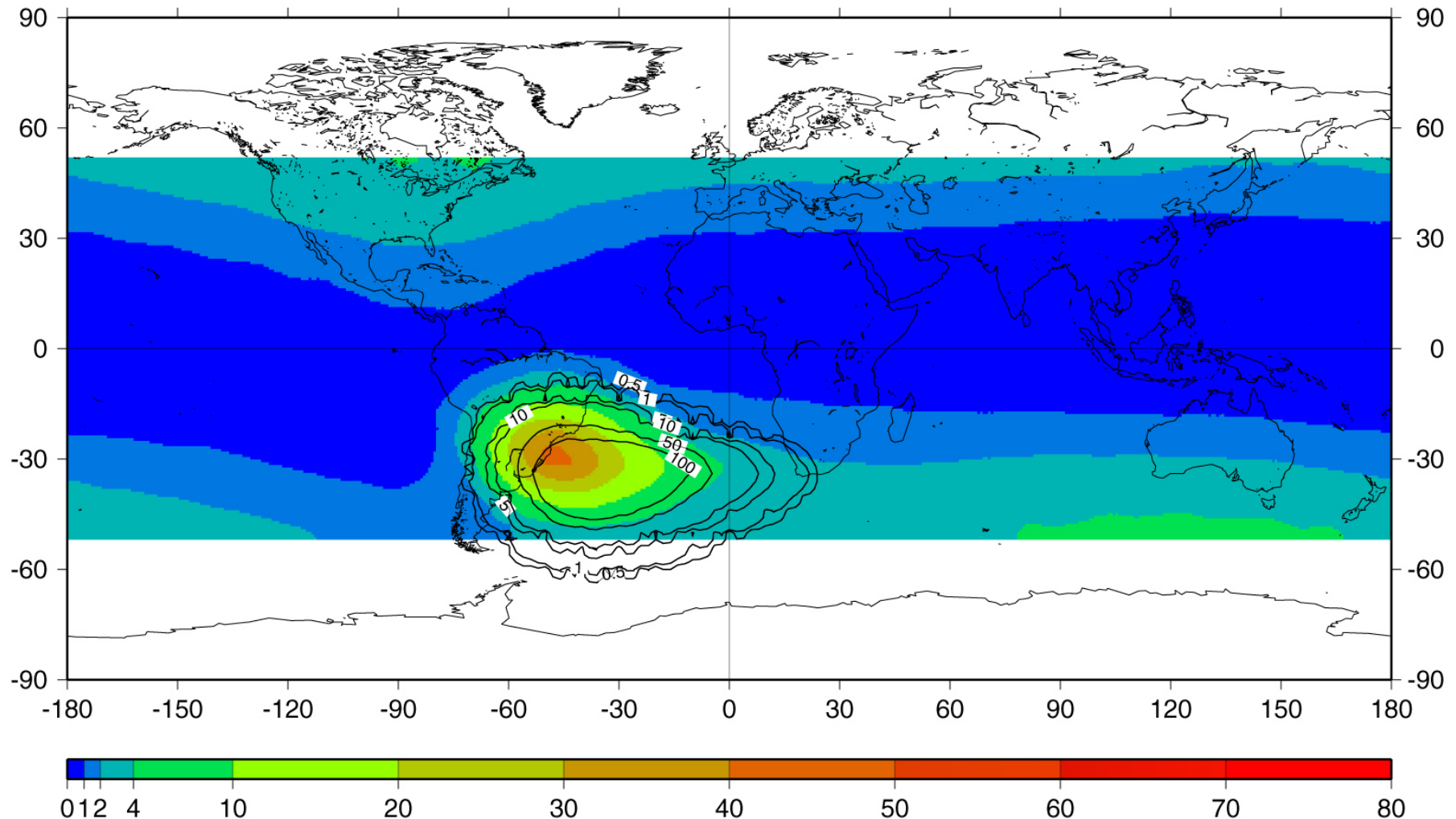


図. 2001年3月23日から7月6日にかけてJAXAのボナー球中性子測定装置を用いてISS内で測定された中性子(5~400MeV)の平均線量当量率分布;高度約350km、軌道傾斜角51.6°で地球を周回するISSはSAA上で捕捉放射線帯に触れる.

太陽粒子線

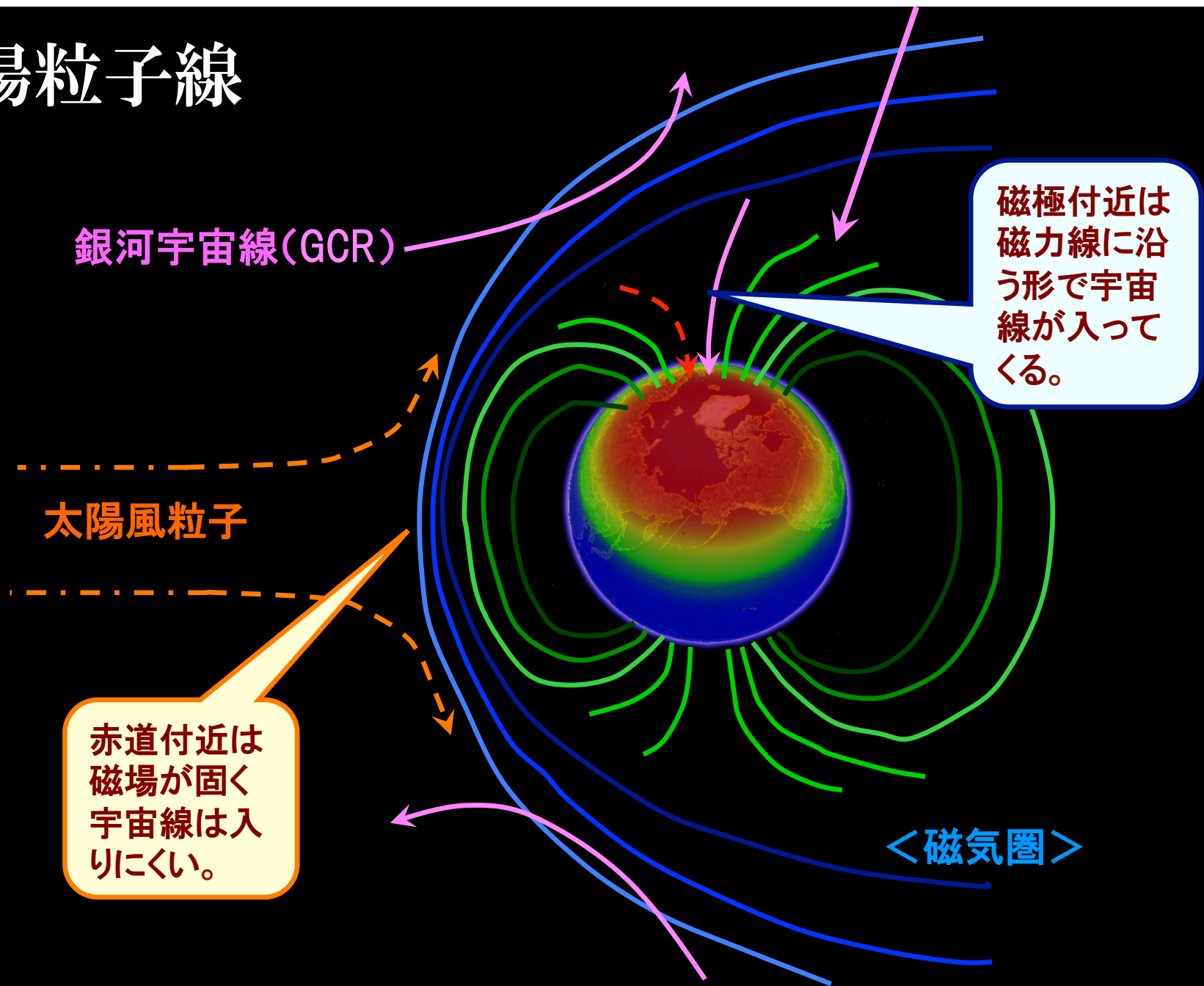


図. 地球周辺の磁場環境 (イメージ).

先月の太陽フレア (1)

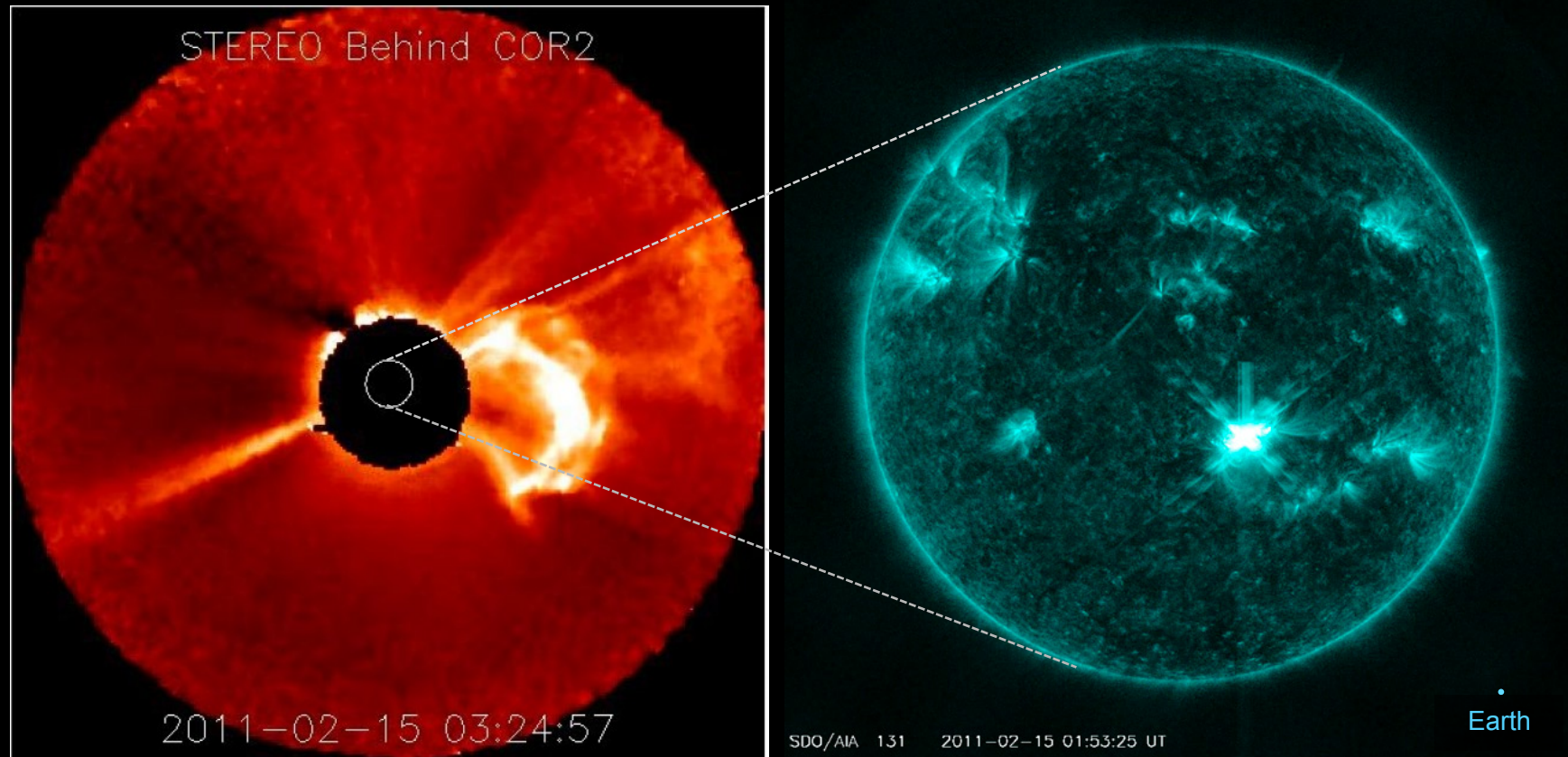
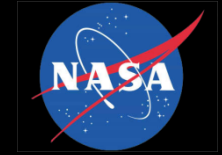


図. 2011年2月15日に発生した巨大な太陽フレアの画像:左はNASAのSTEREO (Solar TERrestrial RElations Observatory) 、右はNASAのSDO (Solar Dynamics Observatory) / AIA (Atmospheric Imaging Asembly) によるUV画像.

先月の太陽フレア (2)

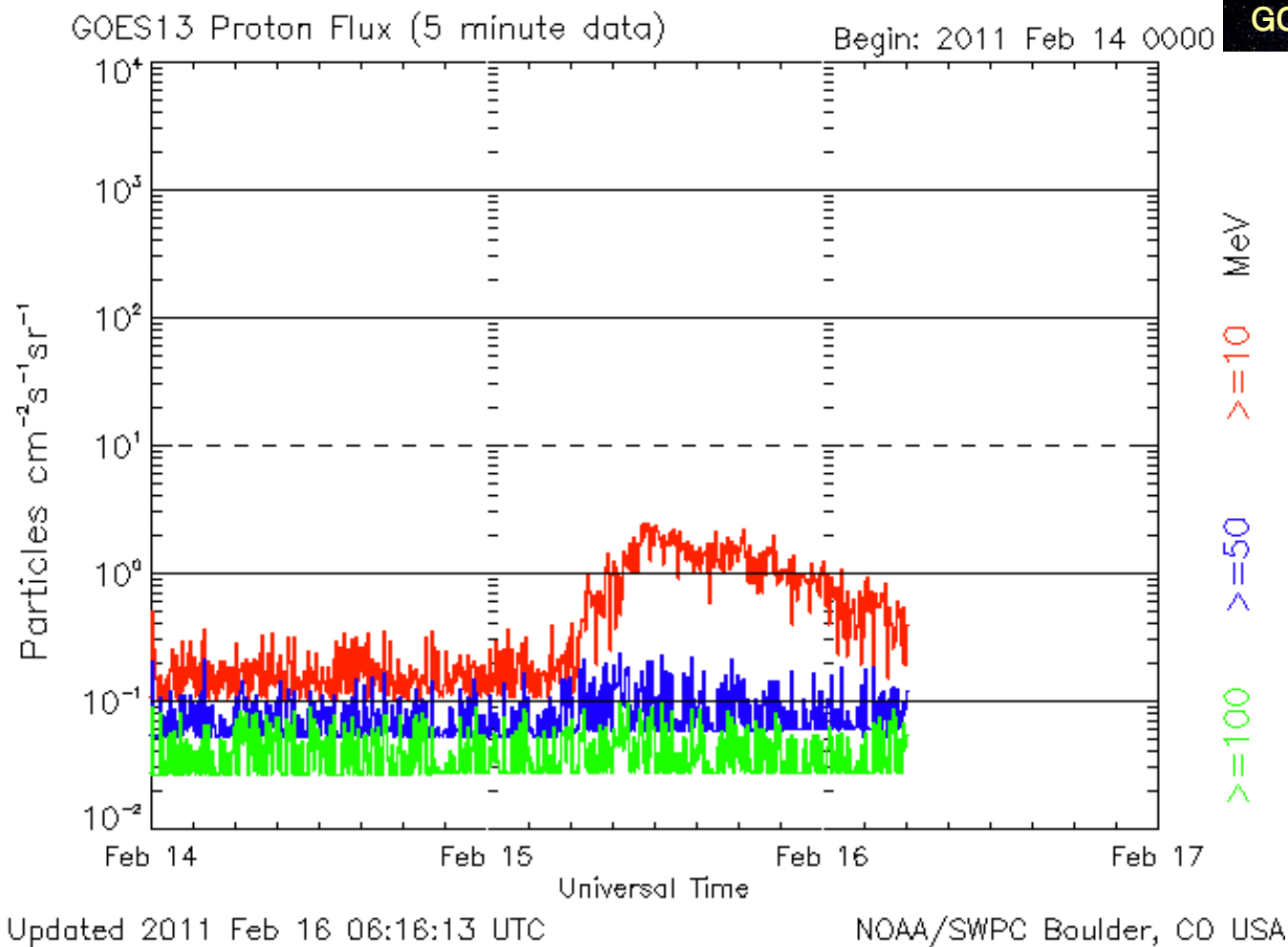


図. 2010年2月15日に発生した太陽フレアに伴い、上空約35,00kmで地球を周回する人工衛星(GOES衛星)で観測された高エネルギー陽子の増加.

銀河宇宙線(GCR)

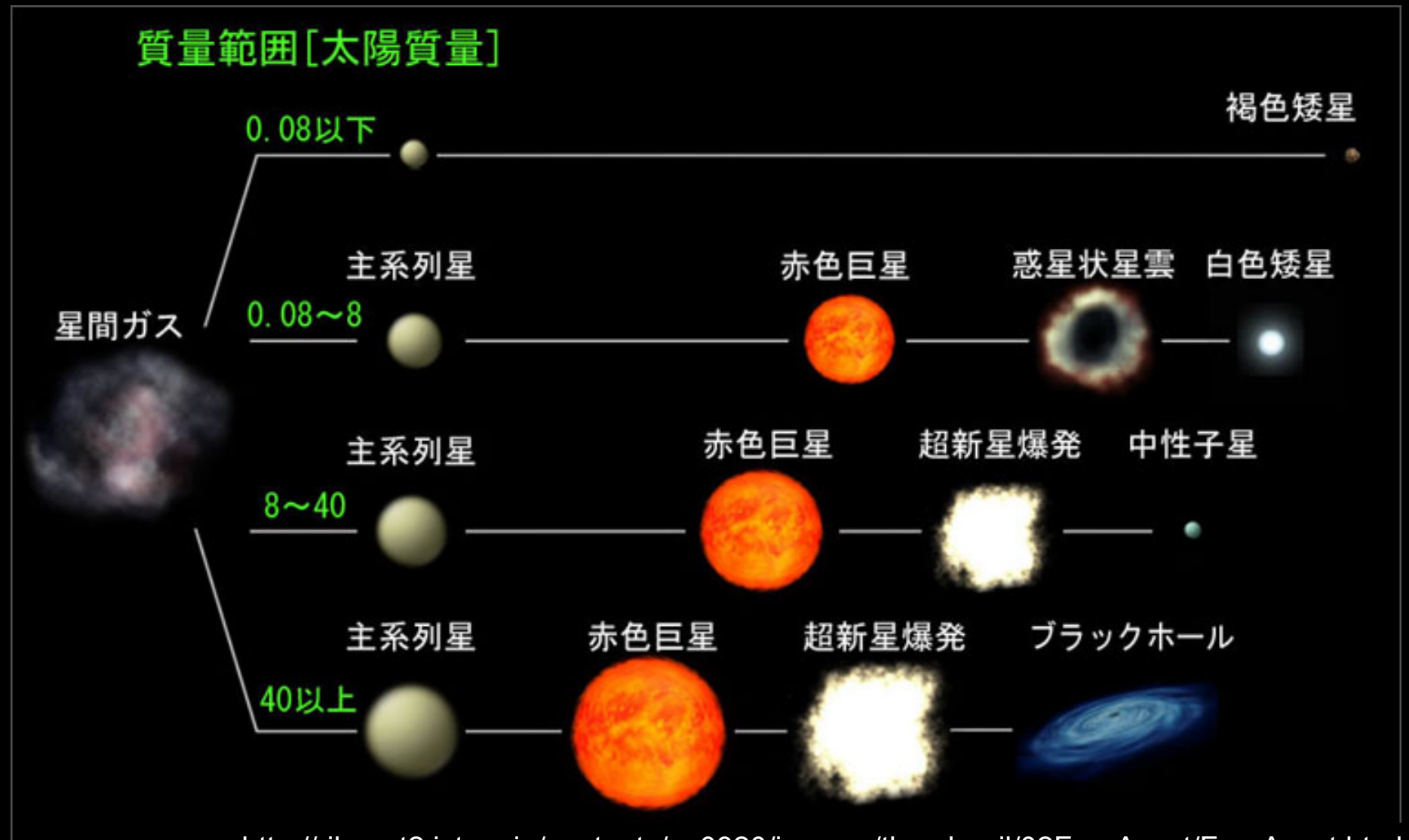


図. 星の一生; 質量に応じて大きく4つのパターンがある.

GCRの組成

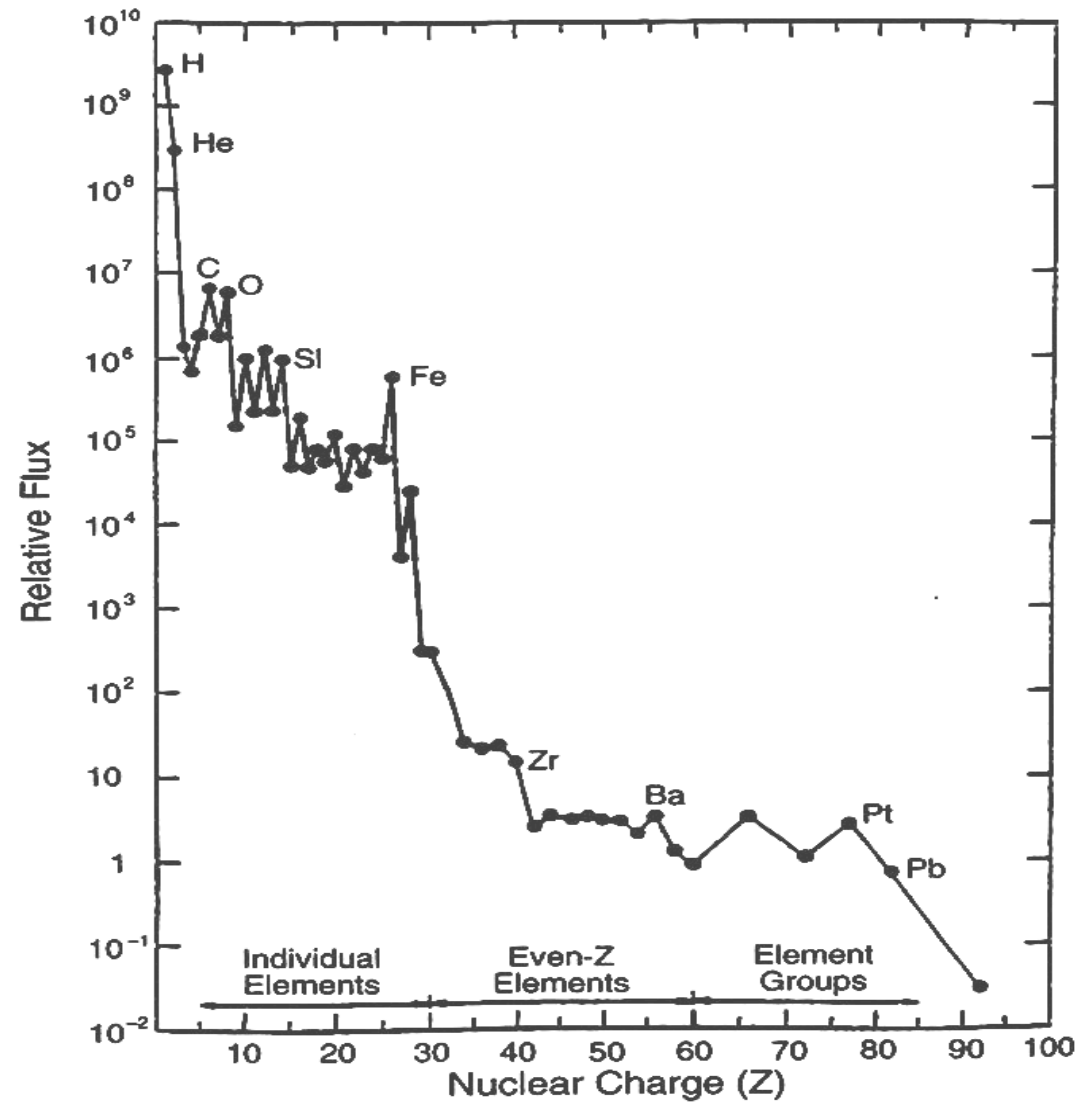


図. 原子番号別にプロットした銀河宇宙線の相対フラックス. ケイ素 (Si)のフラックスを 10^6 として基準化している (Mewaldt, 1988).

GCRのエネルギー

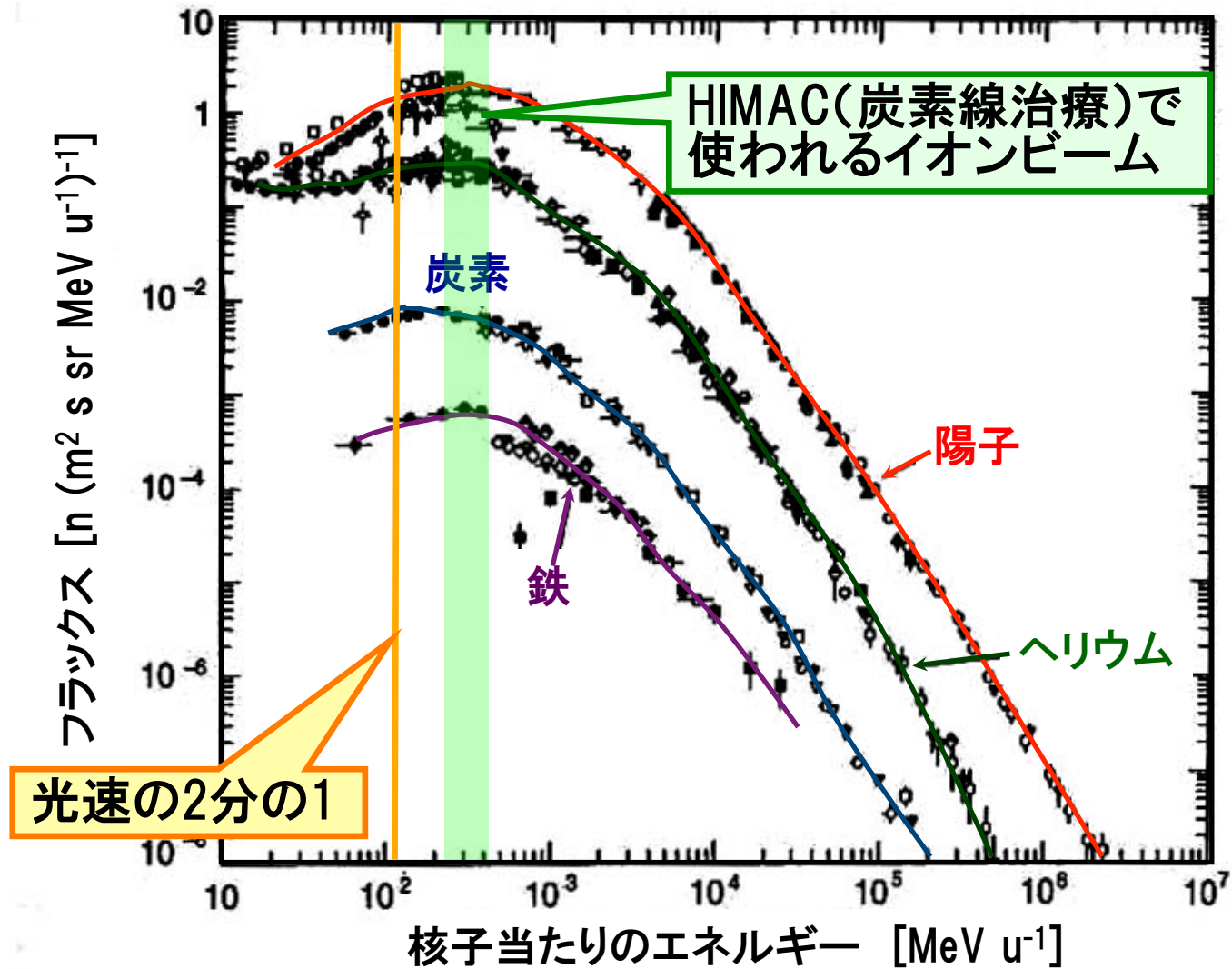


図. 銀河宇宙線の主要な核種についてのエネルギー分布 (Simpson, 1983).

太陽活動の影響

太陽活動が活発なほどGCRは弱くなる。

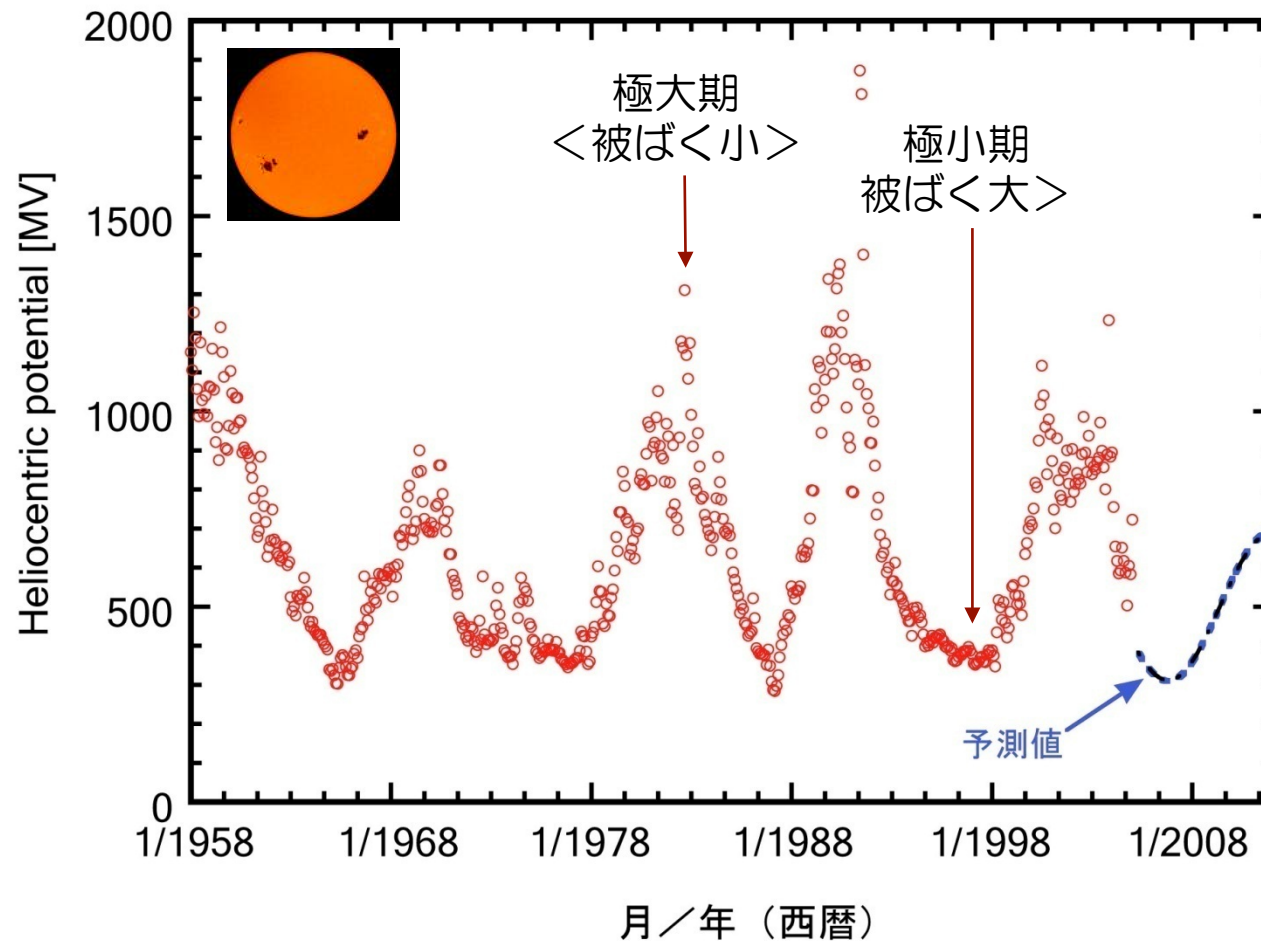


図. 太陽活動の強さを表すヘリオセントリックポテンシャルの月平均値の過去45年(1958～2003年)における変動. 航路線量の計算にはこれらのデータの5パーセンタイル値を採用した.

太陽活動に伴うGCR強度の変化

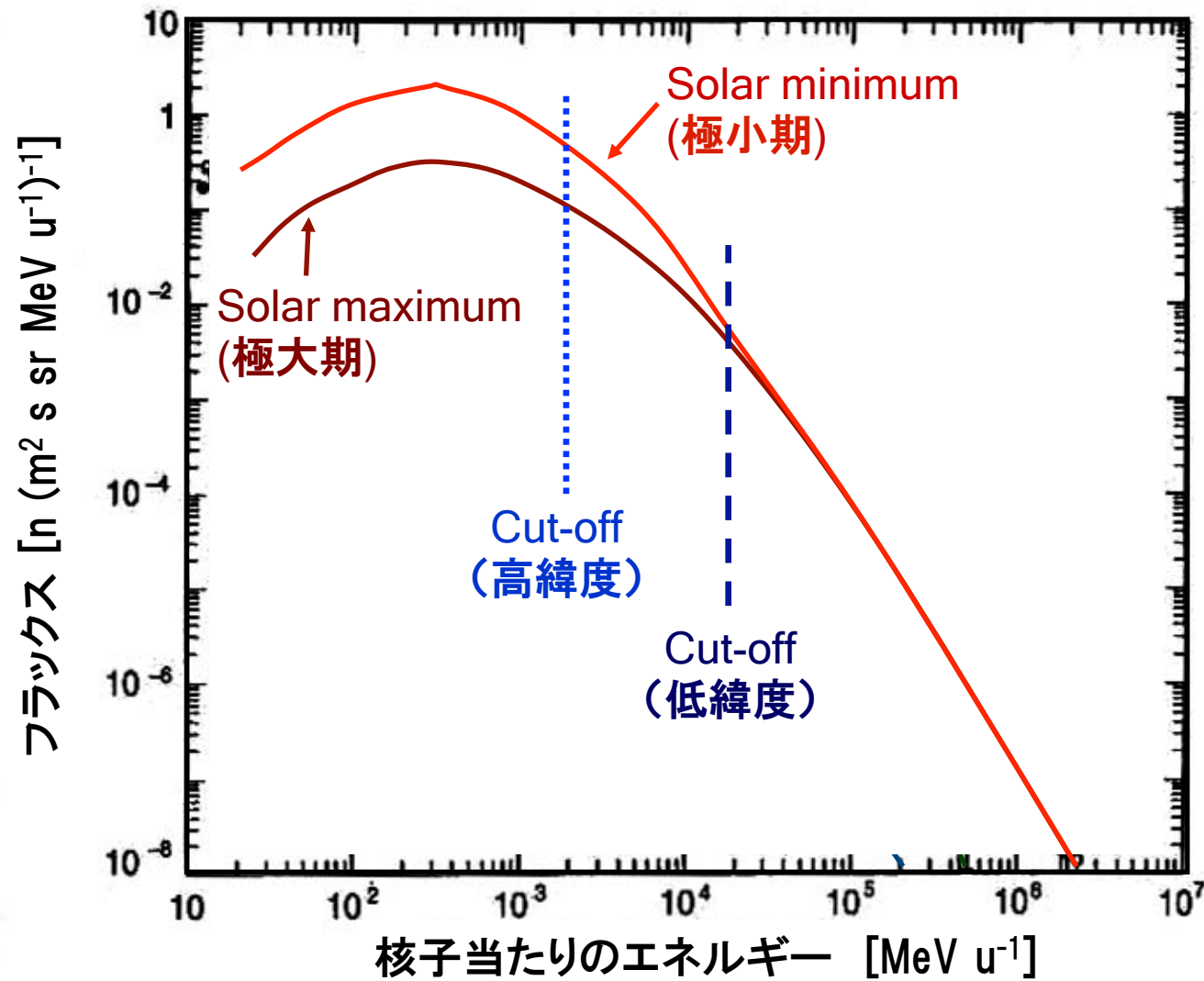
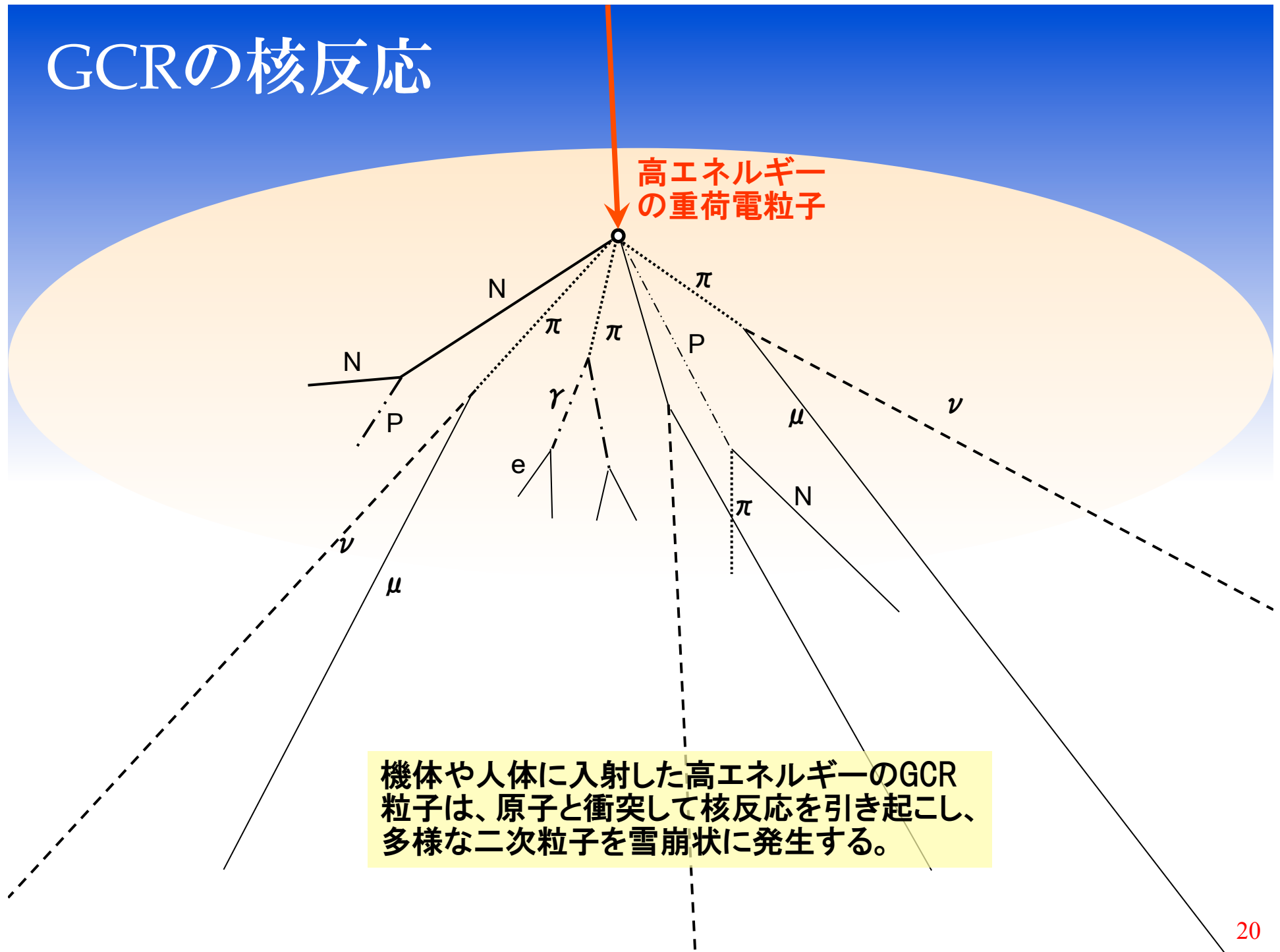


図. 銀河宇宙線陽子のフラックスに太陽活動が及ぼす影響の概念図.

GCRの核反応



遮蔽物の効果

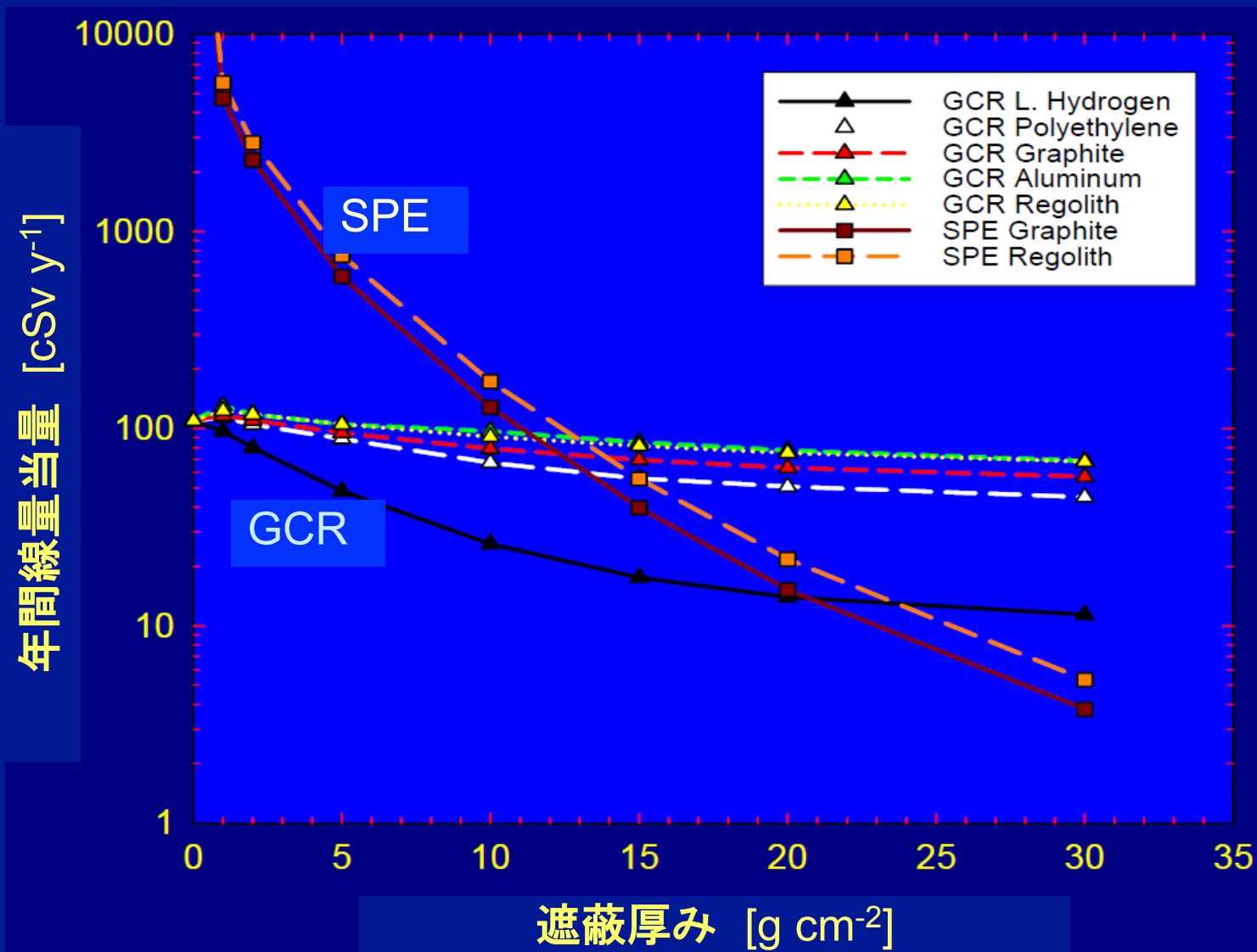


図. 各種材質の遮蔽物に関する厚さと線量の関係；SPEには1972年8月のフレアを想定している。

Courtesy of Francis A. Cucinotta



宇宙飛行に伴う被ばく

地表での被ばく (日本)

特段何もしなくても年間 2mSv程度の被ばくを受けている。

表. 自然放射線により 1 年間に受ける実効線量.

種 類	世界平均 (低－高) [mSv]	日本平均 [mSv]
宇宙線	0.4 (0.3 – 1.0)	0.27
大地放射線	0.5 (0.3 – 0.6)	0.32
⁴⁰ K等の摂取	0.3 (0.2 – 0.8)	0.41
ラドン等の吸入	1.2 (0.2 – 10)	0.45
合 計	2.4 (1 - 10)	1.45

出典: 2000年国連科学委員会報告(UNSCEAR)
「ナースのための放射線医療」(朝倉書店)

放射線防護のための量

吸収線量



$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

..... Absorbed energy [J]
..... Mass [kg]

等価線量



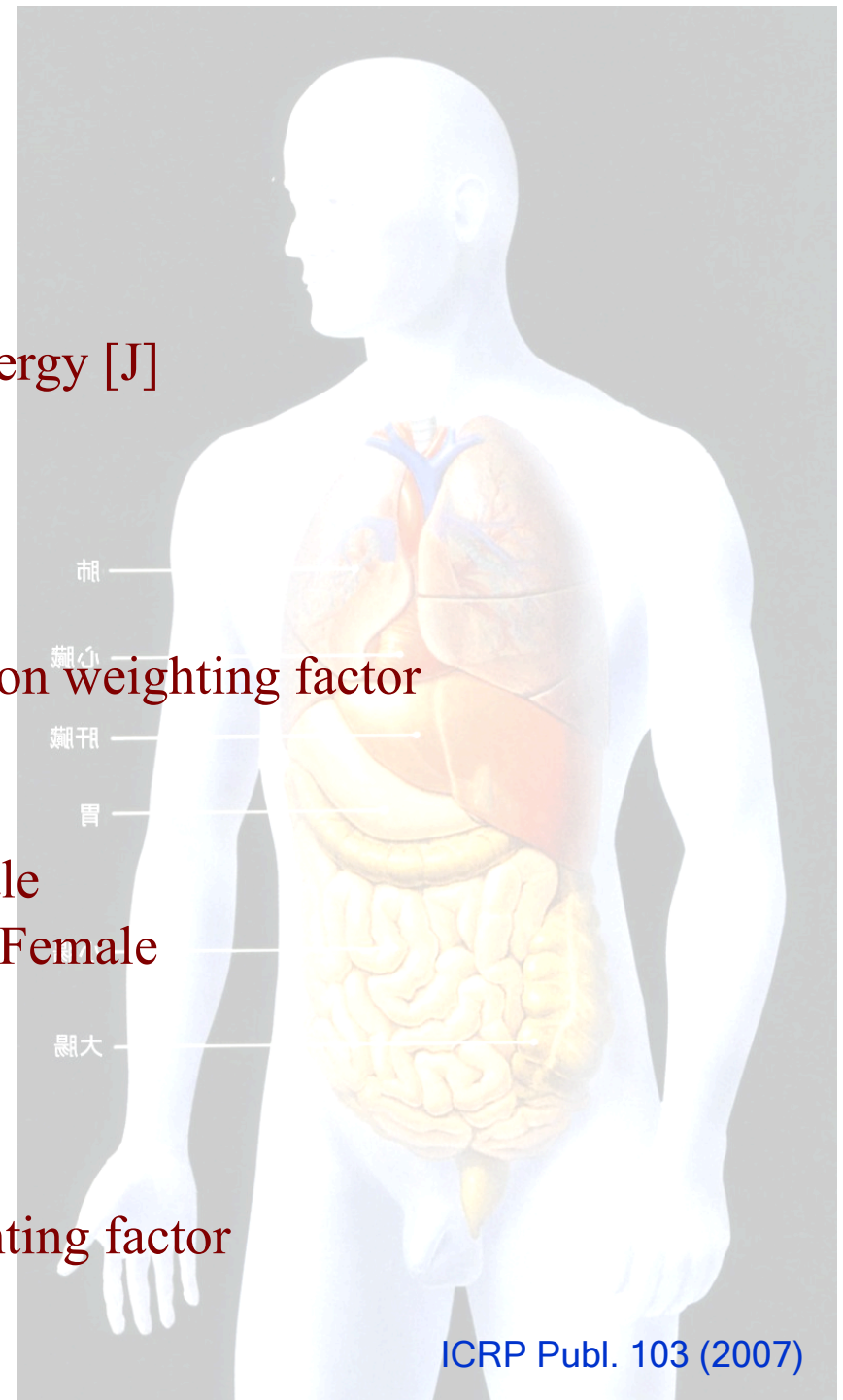
$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

..... Radiation weighting factor

実効線量

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right]$$

..... Male
..... Female
..... Tissue weighting factor



ICRP Publ. 103 (2007)

線質による生物影響の違い

線質の異なる粒子は異なる生物効果をもたらす。

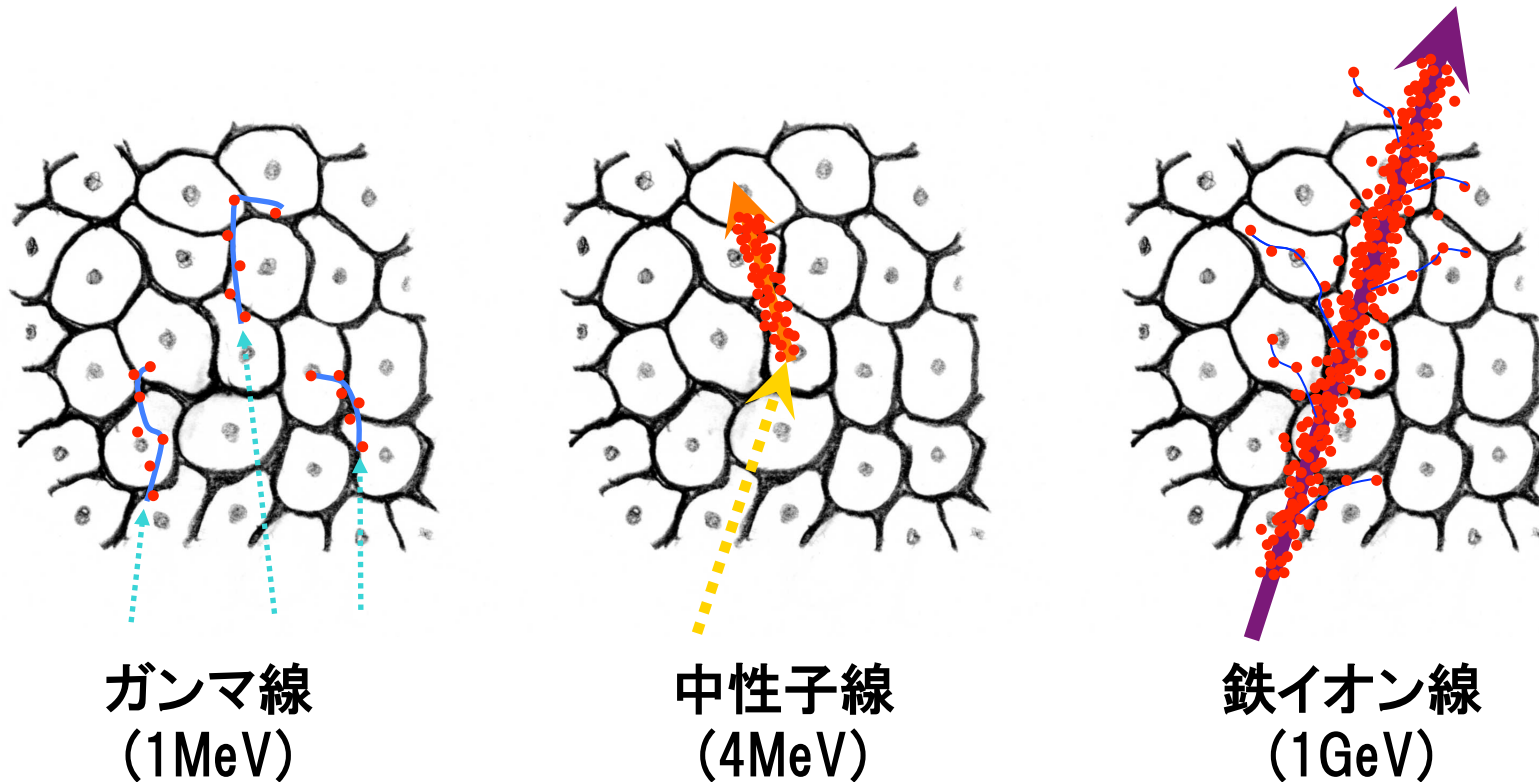
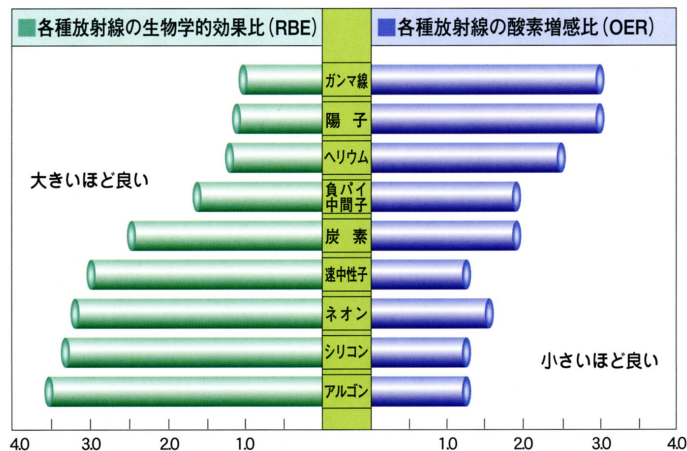
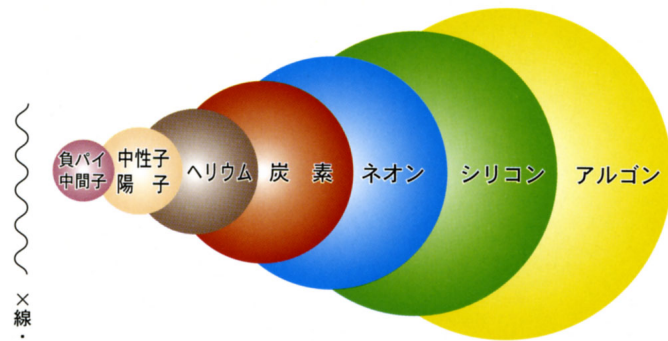


図. 線質の異なる3つの粒子(ガンマ線、中性子線、重粒子線)の細胞に対するエネルギー付与の分布;電離現象を赤点で示している。

DNA損傷への電離密度の影響

概して電荷の大きな粒子ほど生物効果は高い。



(放医研パンフレットより転載)

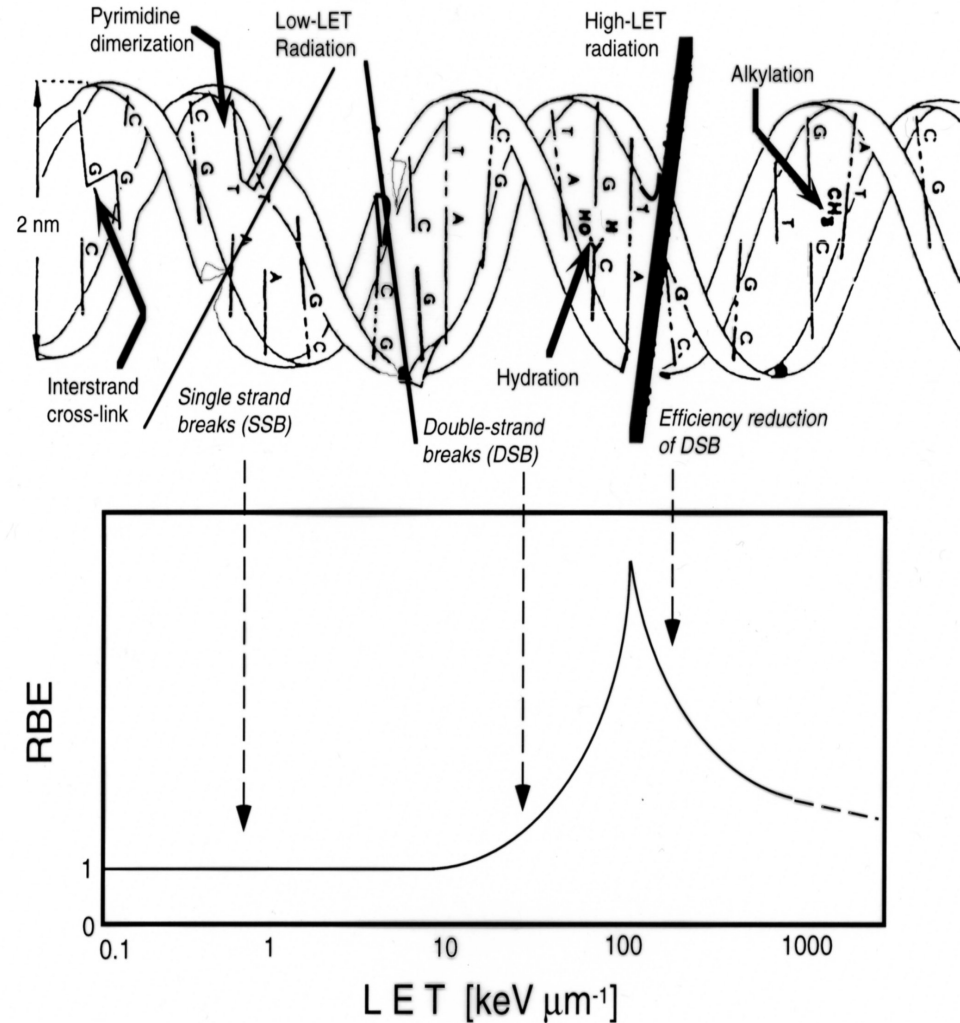
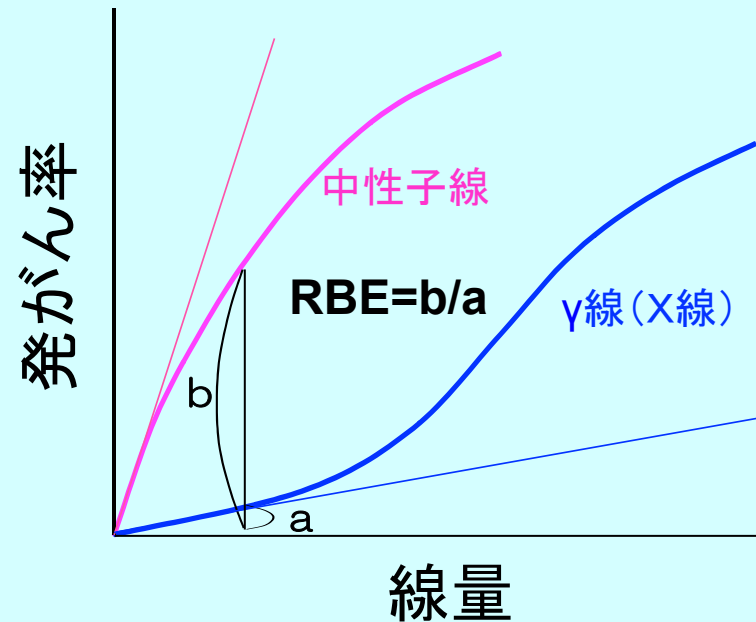


図. DNA切断と生物効果 (RBE) との関係.

線質の評価方法

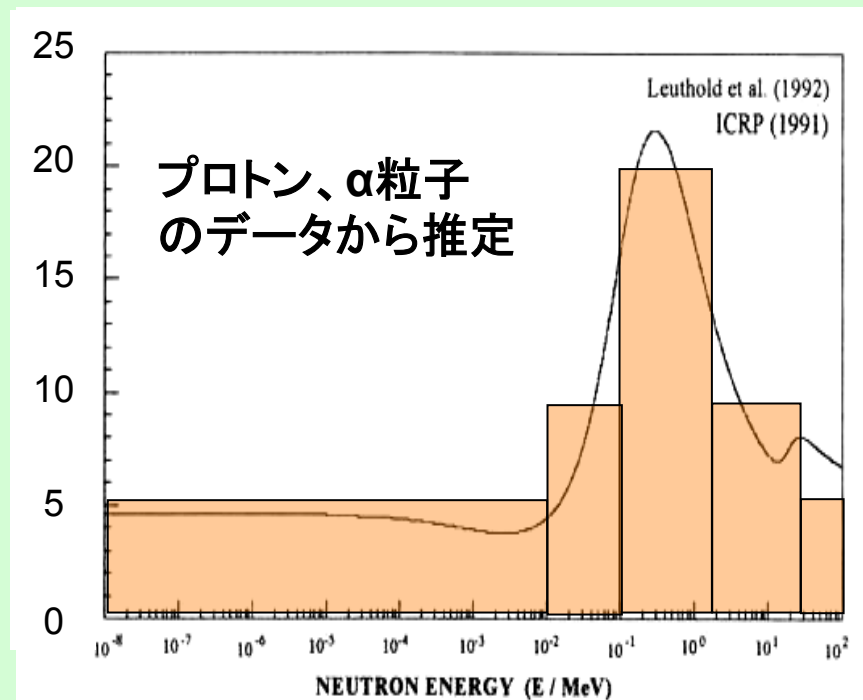
生物学的効果比(RBE) :

γ 線(X線)に比した中性子線の影響の強さ



放射線加重係数(W_R) :

実効線量(Sv) = Gy $\times$ W_R



放射線加重係数 (全粒子)

ICRP Publ.103 (2007)

表. 新たに勧告された放射線加重係数(w_R)の値; 比較のため1990年勧告の値を併せて示す.

放射線のタイプ	w_R	1990年勧告値
光子	1	1
電子とミュー中間子	1	1
陽子と荷電パイ中間子	2	5
		(陽子のみ)
アルファ粒子、核分裂片、 重イオン	20	20
中性子	連続関数 (図Ⅱ.1参照)	階段関数

注) すべての数値は、人体へ入射する放射線、又は、内部放射線源に関しては摂り込まれた放射性核種から放出される放射線に関係する.

放射線加重係数 (中性子)

ICRP Publ.103 (2007)

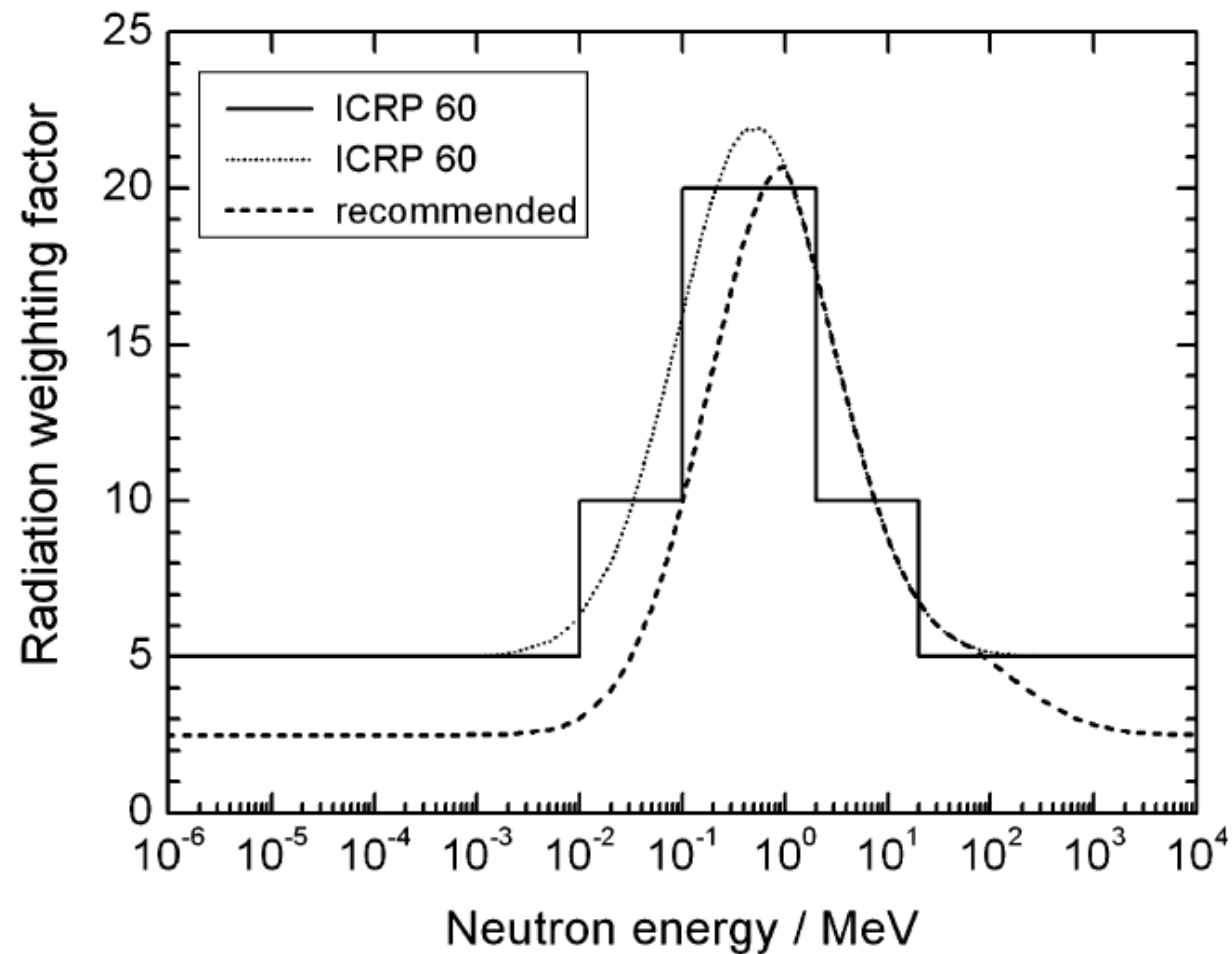


図. 新たに勧告された中性子の放射線加重係数(w_R)とエネルギーの関係; 1990年勧告(ICRP Publ.60)の w_R 値も併せて示す.

‘線量当量’について

国際放射線防護委員会 (ICRP)により、線エネルギー付与(LET)の関数である線質係数を用いる量「線量当量」も提示されている。

at $L < 10$,

$$Q(L) = 1$$

at $10 \leq L < 100$,

$$Q(L) = 0.32L^{-2.2}$$

at $L \geq 100$,

$$Q(L) = 300/\sqrt{L}$$

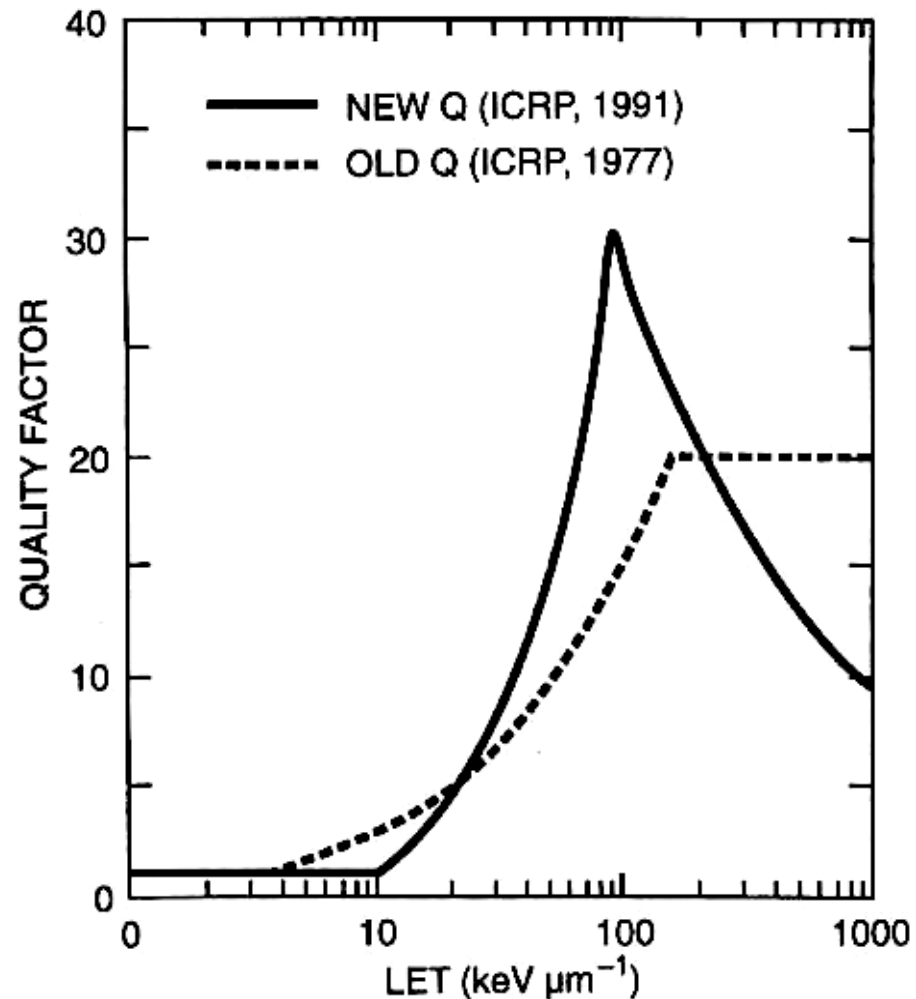


図 ICRP Publ.26 (1977)とPubl.60 (1990)で示された線エネルギー付与(LET)と線質係数(Q)との関係.

過去の宇宙飛行における被ばく

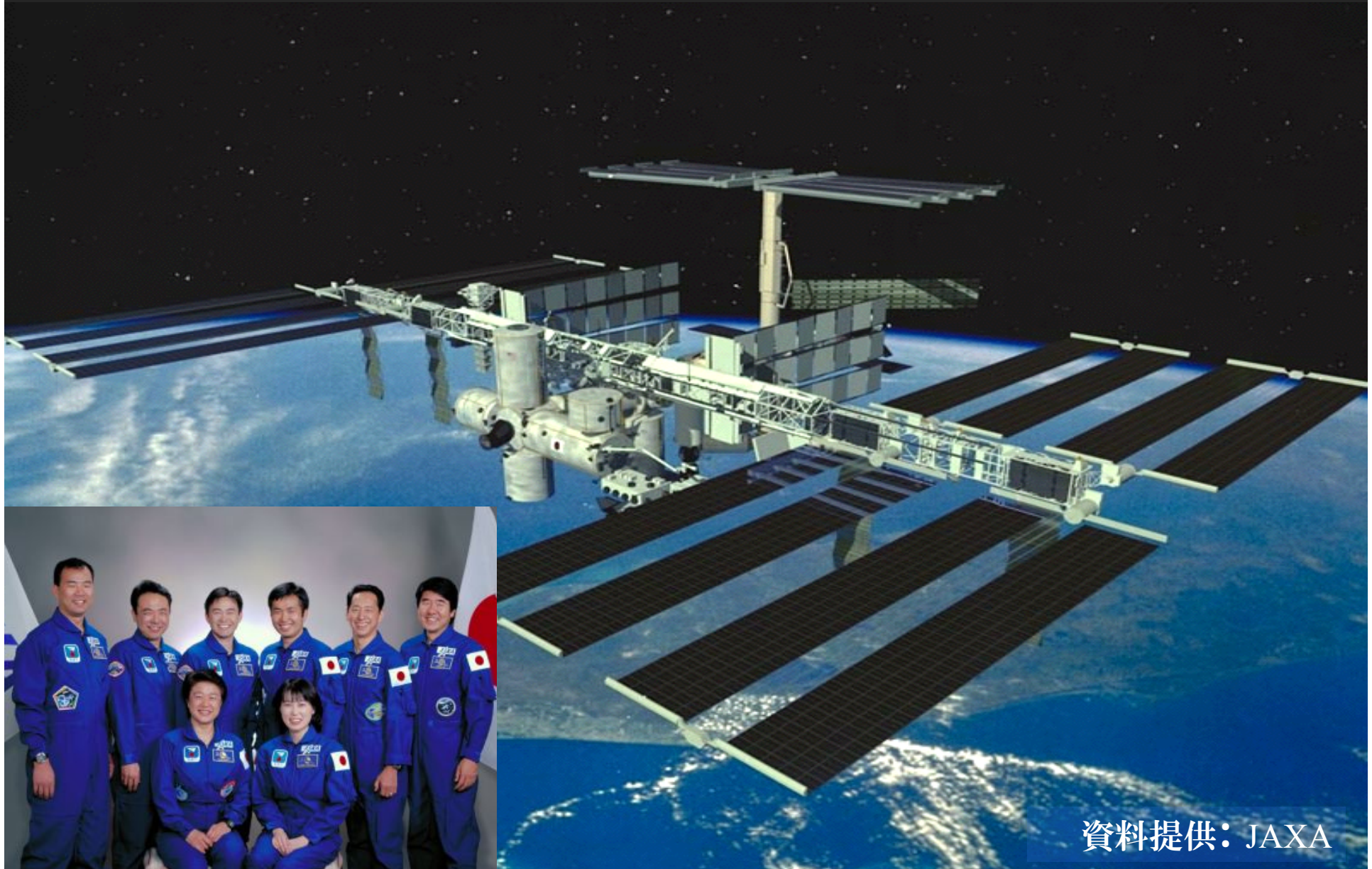
表. 過去(1999年まで)にNASAが実施した有人宇宙飛行プログラムにおいて、飛行士が受けたと推定される造血器(深さ5cm位置の赤色骨髄)の線量率.

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	0.18	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。

国際宇宙ステーション (ISS)



資料提供: JAXA

国際宇宙ステーション(ISS)の軌道



www.nasa.gov

高度約350km、軌道傾斜角 51.6° を周っている。

ISSにおける被ばく

表. 国際宇宙ステーション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

火星ミッション

NASAの第一次計画では、行きに半年、帰りに半年、火星での滞在が1年から1年半、合計で2年から2年半程度のミッションとなる予定。

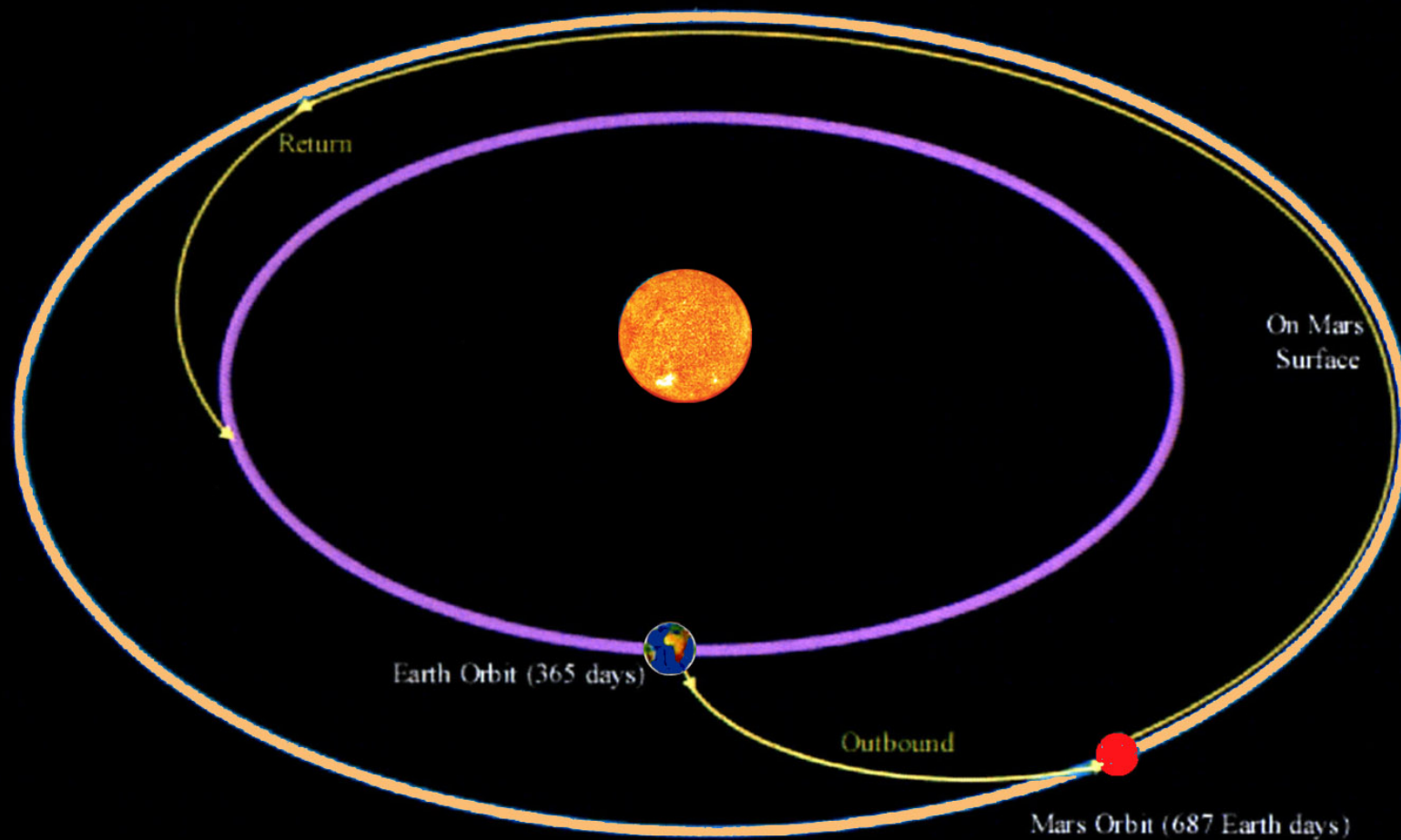


図. NASAが計画している火星ミッション（第1次案）のルート。

火星における被ばく

火星は磁場が無く、 CO_2 の大気も薄いので、地表でも宇宙線の強度はあまり下がらない。SPEにより高線量の被ばくを受ける恐れも高い。

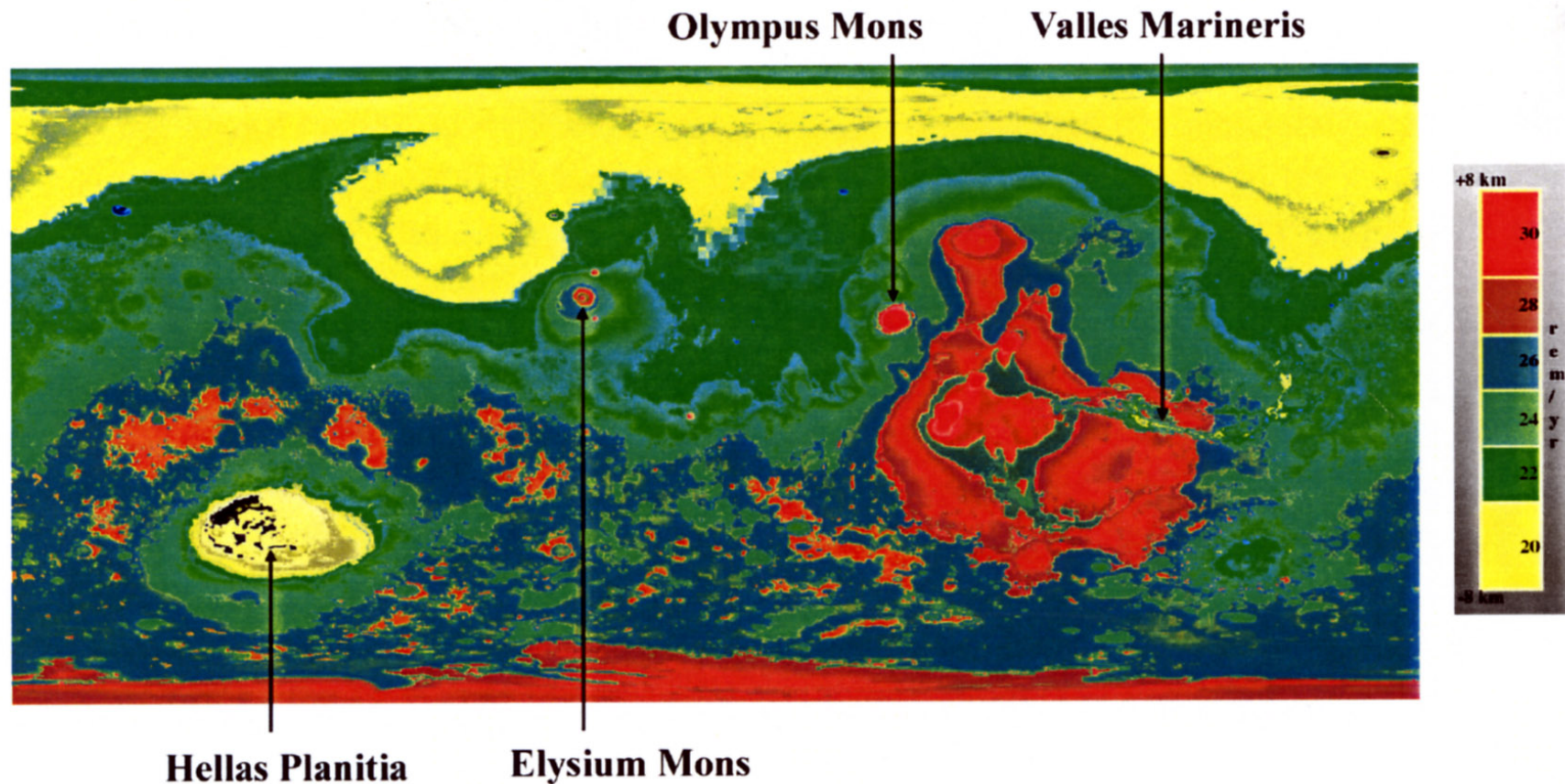


図. 火星表面における放射線強度の計算値の分布(F. A. Cucinotta et al., 2001).

実効線量値の比較(宇宙飛行含む)

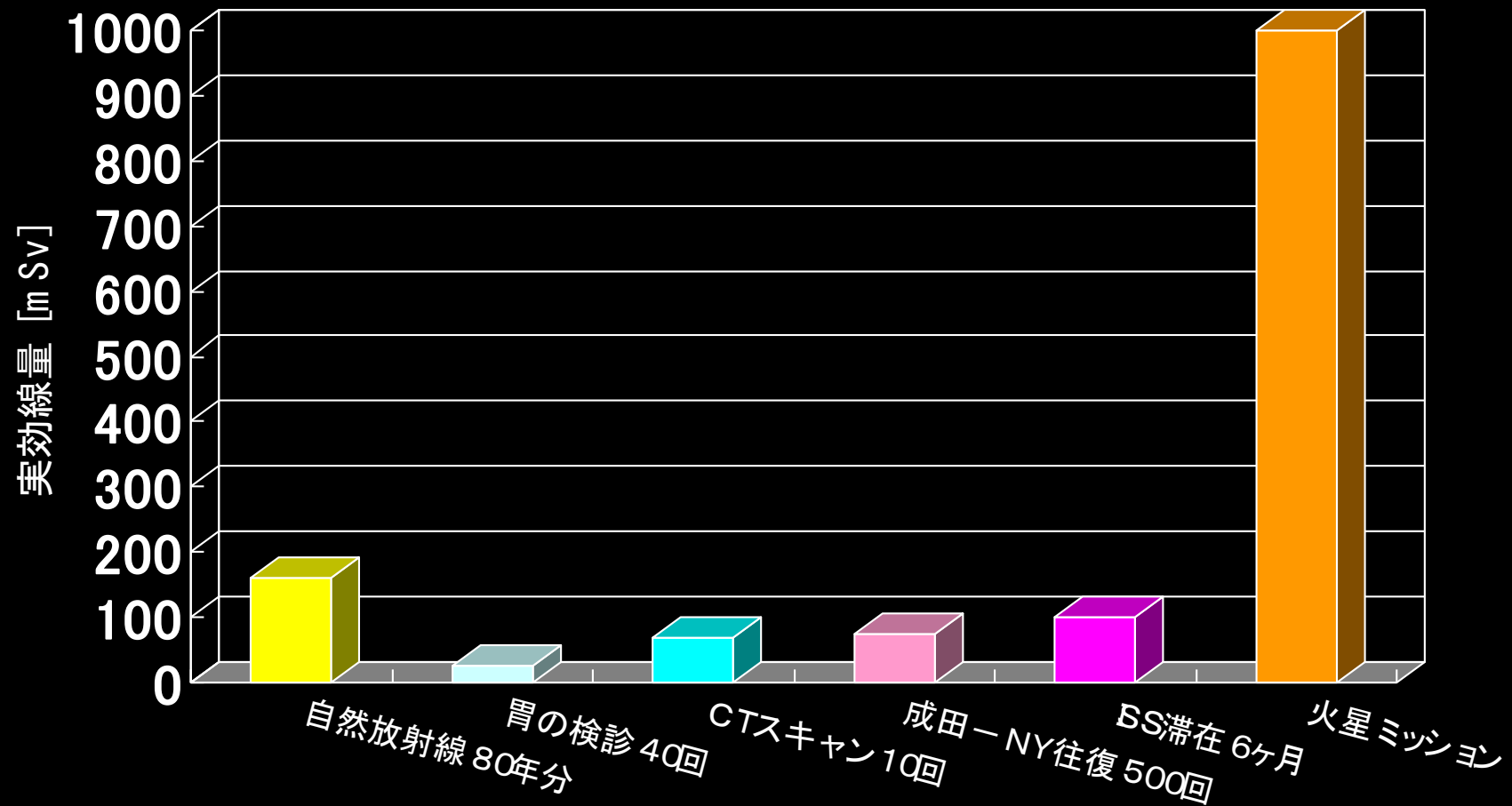


図. 宇宙ミッションを含む様々な状況での実効線量値.

火星は魅力的な星である

火星は、当面、ヒトが長期滞在可能な唯一の地球外惑星である。

表. 金星、地球、火星の定数.

	自転周期	平均表面温度	表面重力	大気圧
金星	243 日	460℃	0.91G	90 気圧
地球	1.00 日	15-20℃	1.00G	1 気圧
火星	1.03 日	-52℃	0.38G	0.008 気圧

宇宙線被ばくのリスク

‘がんになる確率’の計算方法

がんの罹患率 λ は、到達年齢 t 、線量 d および被ばく時年齢 e の関数として、次式で与えられる。

$$\lambda(t, e, d) = \lambda_0(t)(1 + f(d) \cdot g(e, t))$$

ここで、 $\lambda_0(t)$ はベースとなるがん罹患率(≡自然発がん率)；
 $f(d)$ は線量反応関係で、しきい値のない直線モデルあるいは直線-2次モデルが広く用いられている。

$g(e, t)$ は時間反応関係を意味し、以下に示すような被ばく時年齢モデルが一般的である。

$$g(e, t) = \exp(\gamma \cdot e)$$

他に、 t のみを変数とする到達年齢モデルが用いられることもある。

$$g(e, t) = t^k$$

ここで、 γ 及び k はデータフィッティングで得られる定数である。

放射線発がんのリスク

放射線被ばくによって致死がんが生じる確率が増える。

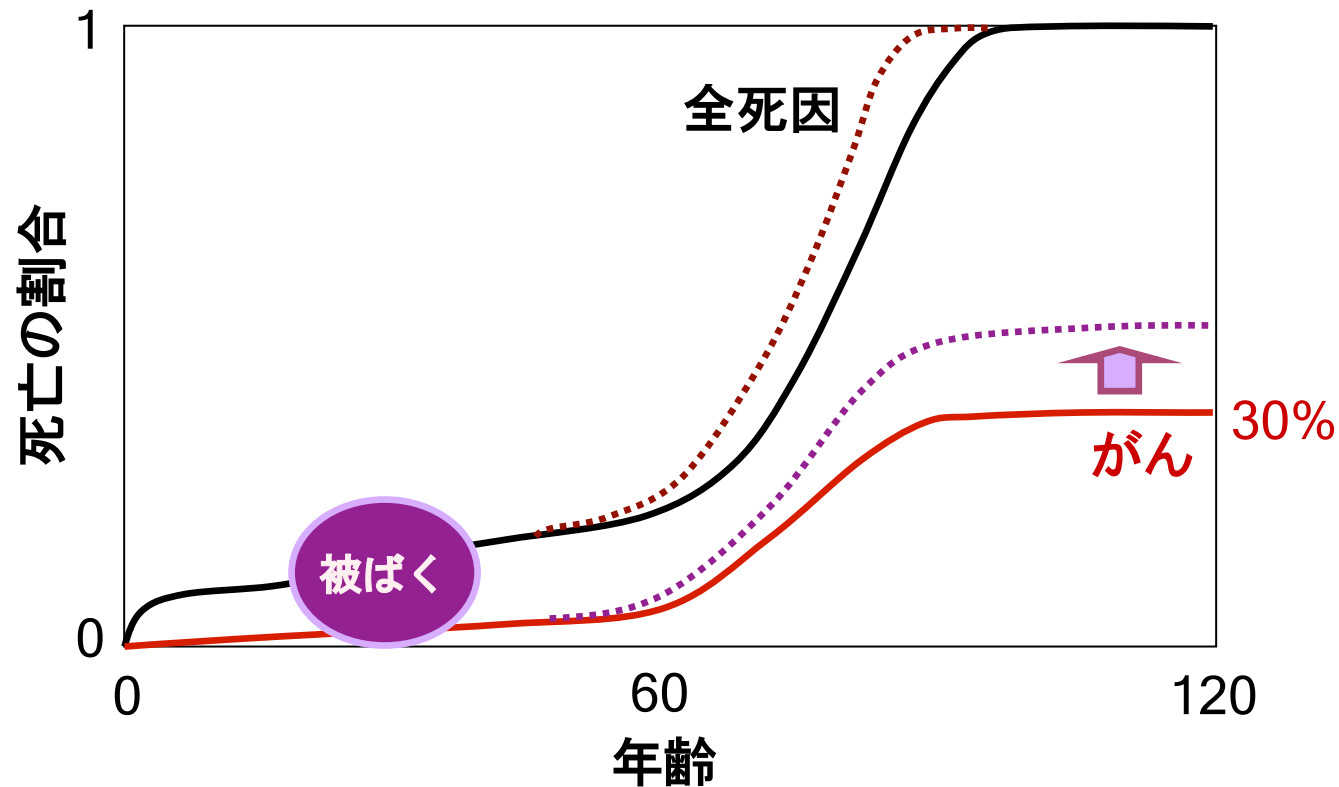


図. ヒトの年齢と死亡割合の模式的な関係. 放射線被ばくによってがんが誘発され、死亡の直接的な原因としての割合が高まる.

放射線発がんのリスク

放射線被ばくと時間によってがんになる確率が増える。

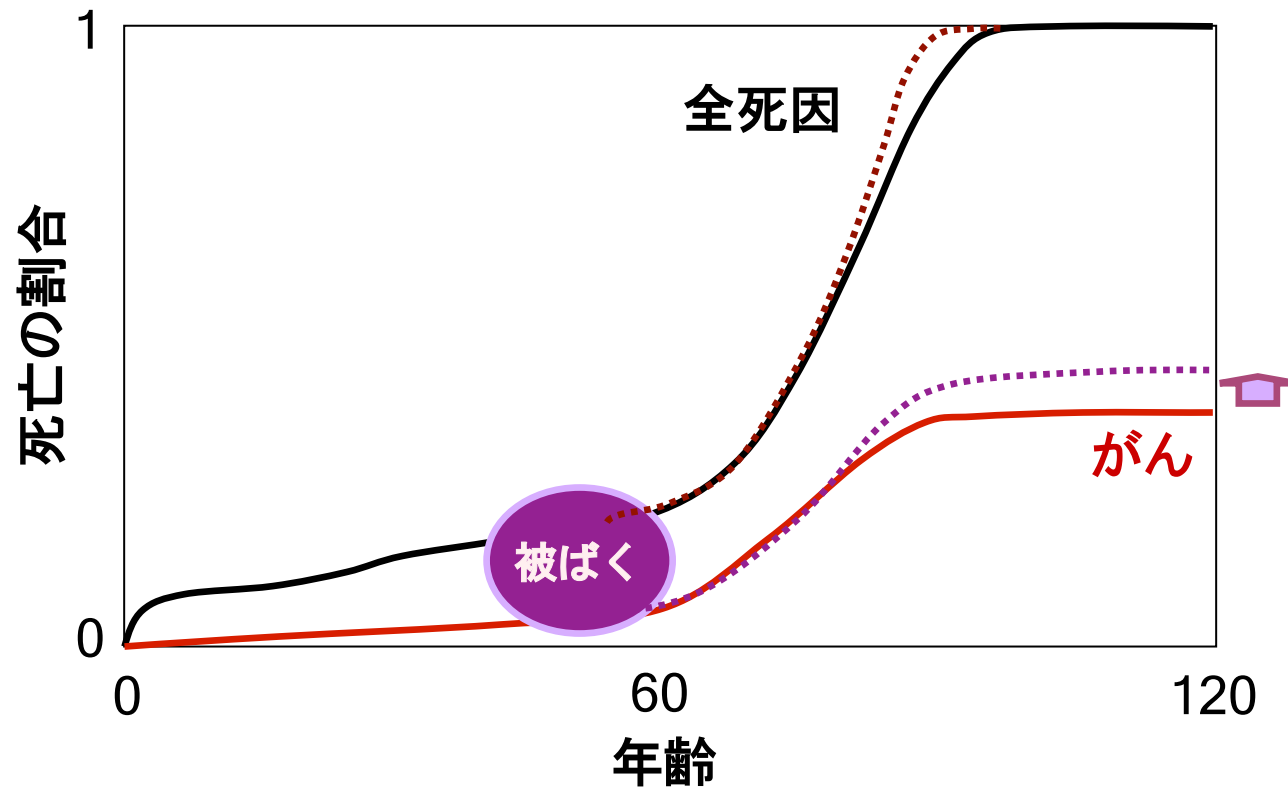


図. ヒトの年齢と死亡割合の模式的な関係. 放射線被ばくによってがんが誘発され、死亡の直接的な原因としての割合が高まる.

名目リスク係数

代表的な集団における、性および被ばく時の年齢を平均化した、単位線量あたりの生涯リスクの推定値。

表. 低線量率放射線被ばくによる確率的影響に関する損害を調整して得られた名目リスク係数 (10^{-2} Sv^{-1})

被ばく集団	がん		遺伝的影響		合計	
	1990	2007	1990	2007	1990	2007
全集団	6.0	5.5	1.3	0.2	7.3	5.7
成人	4.8	4.1	0.8	0.1	5.6	4.2

現行のリスク係数値 ($5\% \text{ Sv}^{-1}$) は引き続き妥当。

実効線量に基づく評価

宇宙飛行のリスクは容認できるか？

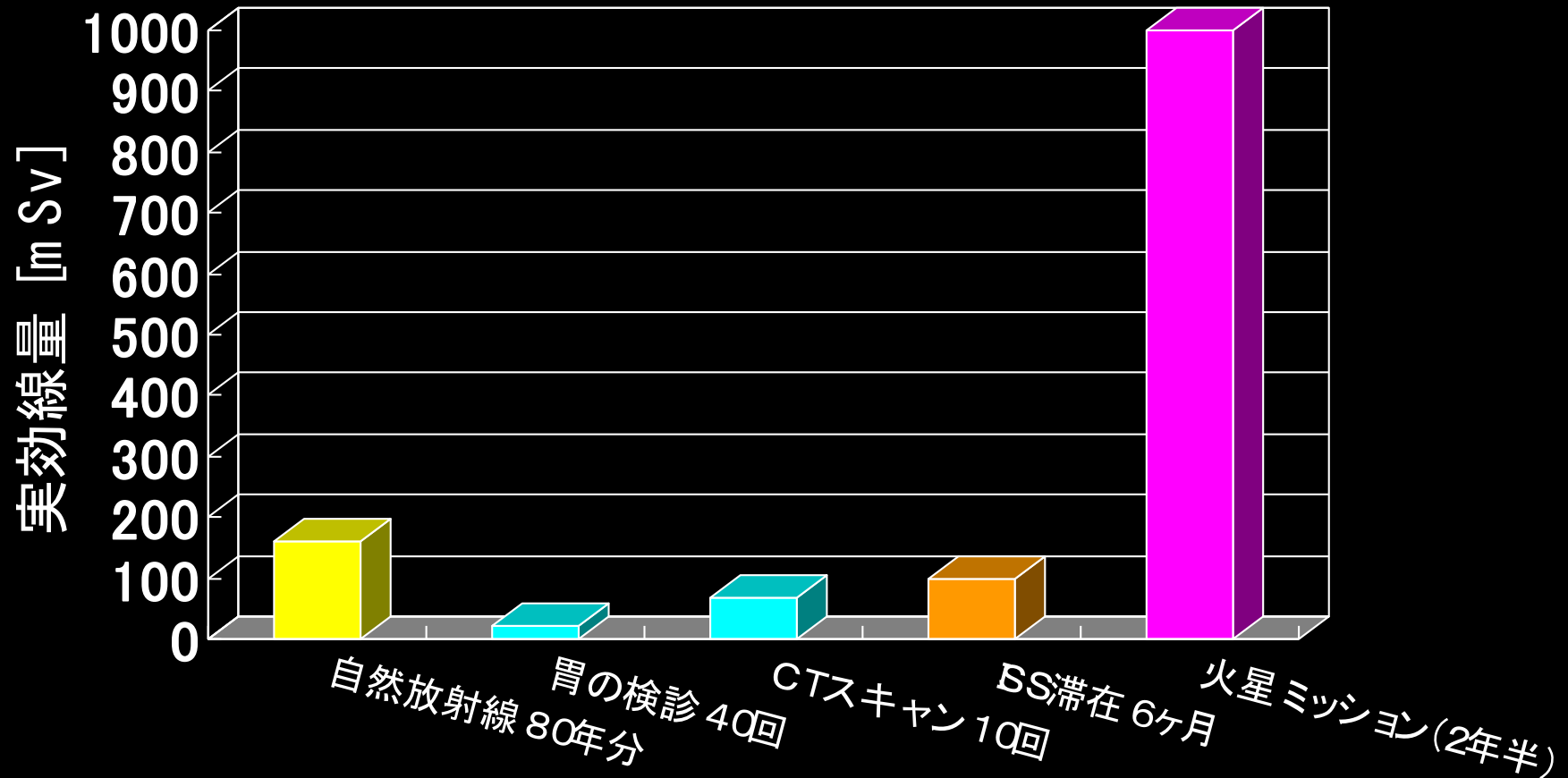


図. 宇宙ミッションを含めた実効線量値の比較. ちなみに、冥王星ミッションでは60Svを超えると見積もられる.

ISS宇宙飛行士のリスク

6ヶ月のミッション1回あたりでは...

$$0.1 \text{ Sv} \times 5 \% \cdot \text{Sv}^{-1} = 0.5 \%$$

生涯に5回のミッションを行うとして...

$$0.5 \% \cdot \text{y}^{-1} \times 5 \text{ y} = 2.5 \%$$

職業被ばくとして生涯にわたり個人の被ばくを管理するならば、社会通念上許容できるリスクの水準と考えられる。

放射線障害防止のための基準

表. ICRPが勧告している線量限度の値.

線量区分	放射線業務従事者		一般公衆
実効線量（全身）	100mSv / 5年	ただし 50mSv / 年	1mSv / 年
女子（妊娠可能者）	5mSv / 3月		
妊娠・出産まで	1mSv		
年等価線量			
眼の水晶体	150mSv		15mSv
皮膚	500mSv		50mSv
手先・足先	500mSv		—

発がんの
リスクとし
て0.5%
以下。

3%程度。

火星ミッションのリスク

火星ミッション1回では…

$$1 \text{ Sv} \times 5 \% \cdot \text{Sv}^{-1} = 5 \%$$

巨大な太陽フレアに1回遭遇すると仮定して…

$$5 \% + 5 \% = 10 \%$$

職業被ばくとしても許容し難い？

“As Low As Reasonably Achievable” (ALARA)で行くしかない。

確定的影響（組織反応）の考慮

火星ミッションのような長期の宇宙飛行では、宇宙線被ばくにより確定的影響（組織反応）が発現する可能性がある。

表. X線またはガンマ線を一時に全身に受けた時の症状.

被ばく線量 (シーベルト)	早期影響の症状	備 考
0.25	ほとんど臨床症状なし	放射線をあびた結果、二日酔いに似た症状が現われるのを放射線宿酔という
0.5	リンパ球一時的減少	
1.0	吐き気、嘔吐、全身倦怠 リンパ球著しく減少	
1.5	放射線宿酔 50 %	
2.0	長期白血球減少	この線量を50 %致死線量という
4.0	死亡 30日間に50 % *	
6.0	死亡 14日間に90 % *	
7.0	死亡 100 % *	

* 治療しない場合

出典:「放射能と人体」(研成社)

宇宙飛行士の被ばく管理

日本人宇宙飛行士の運用基準 (1)

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



年間5mSvの意味合い

表. ICRPが勧告している線量限度の値.

線量区分	放射線業務従事者	一般公衆
実効線量（全身）	100mSv / 5年 ただし 50mSv / 年	1mSv / 年
女子（妊娠可能者）	5mSv / 3月	
妊娠・出産まで	1mSv	
年等価線量		
眼の水晶体	150mSv	15mSv
皮 膚	500mSv	50mSv
手先・足先	500mSv	—

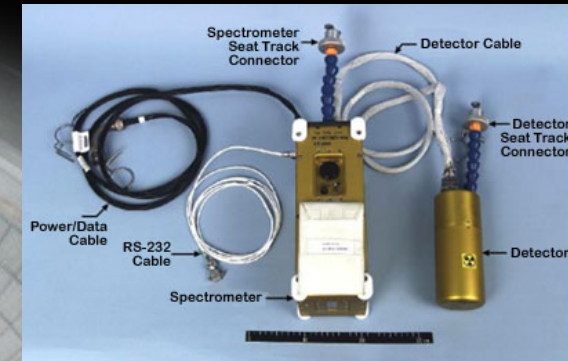
日本宇宙飛行士の運用基準 (2)

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	—

宇宙飛行士の被ばく管理

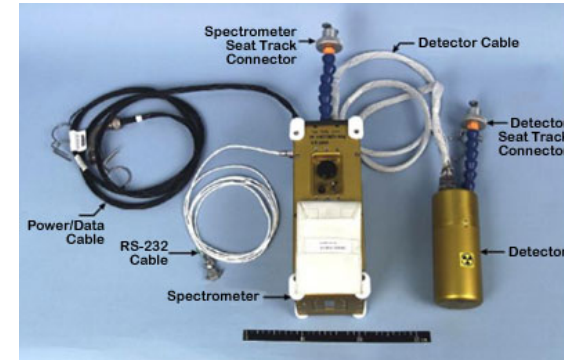
周辺線量の測定を行うための
能動型測定器 (TEPC & IC)



飛行士の個人線量を測るための
受動型線量計(TLD & CR39)

被ばく管理に必要な情報の取得

- 船内放射線環境の情報
組織等価型比例計数管(TEPC)
直径 $2\mu\text{m}$ の軟組織に相当
- 船外放射線環境の情報
荷電粒子スペクトロメータ(CPDS)
層状にしたSi検出器
- 個人被ばく線量の情報
受動型線量計(CPD)
TLDとCR-39の組み合わせ



体外の線量計で正しく評価できる？

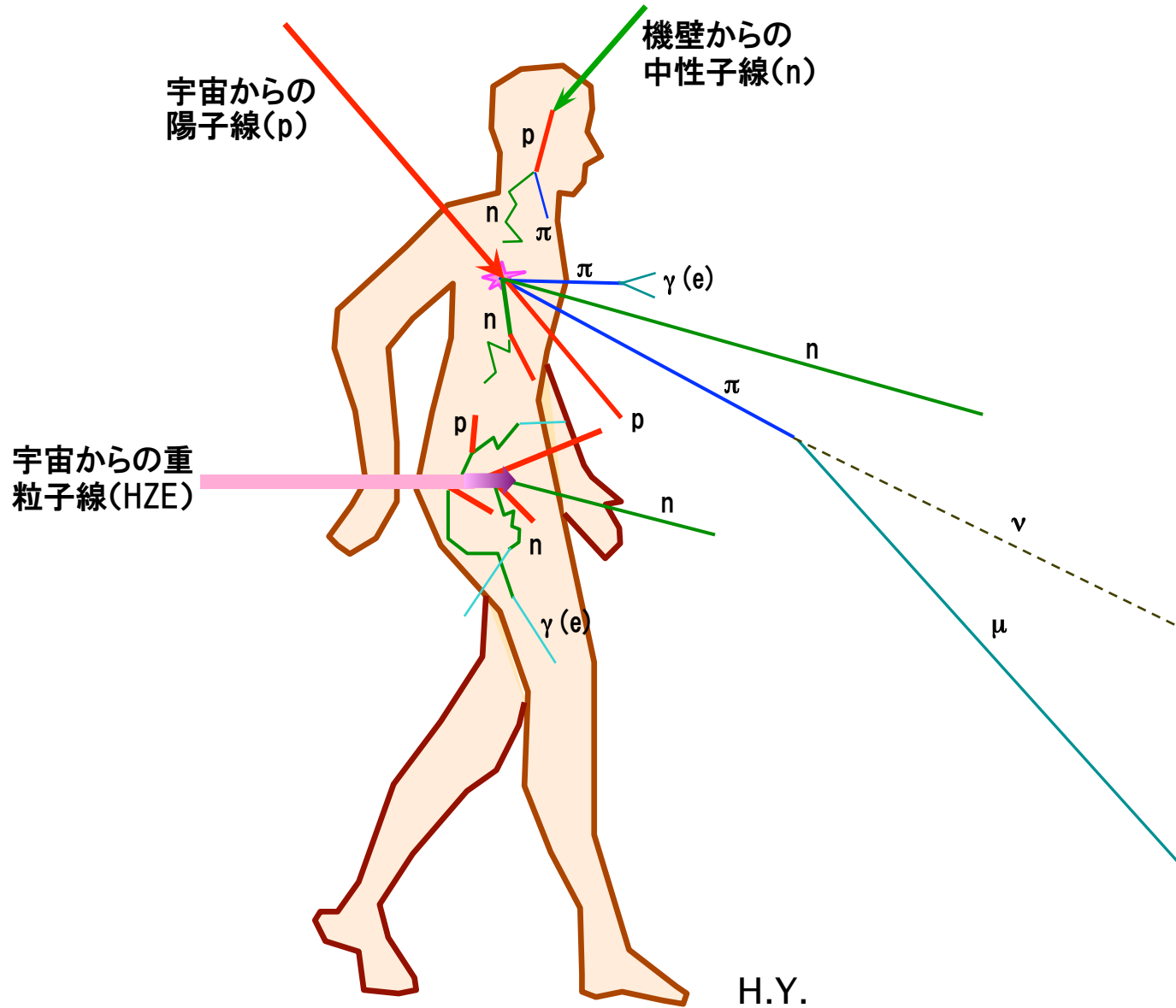


図. 宇宙飛行士の体内で起き得る核反応のイメージ.

個人線量の検証

等身大のファントムを載っけるしかない...



宇宙における実効線量の測定

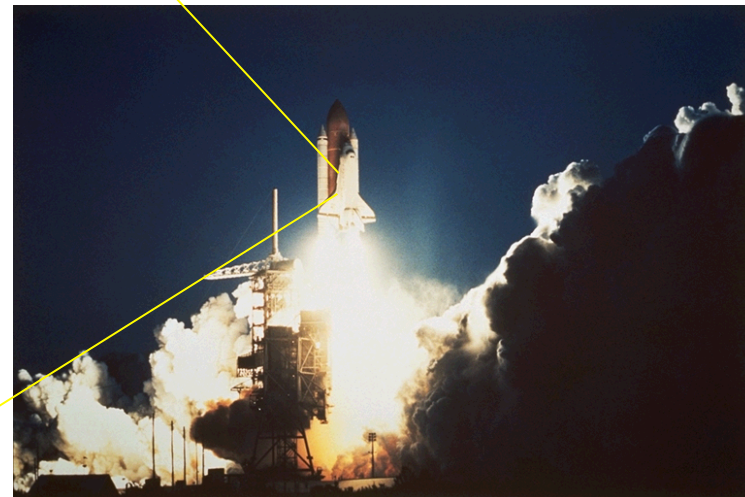
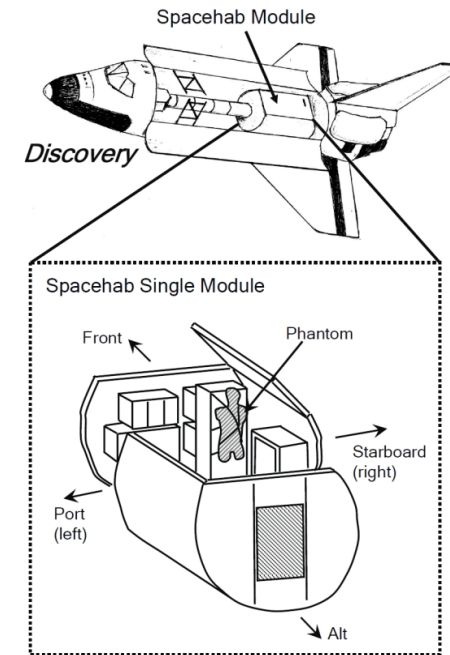
Mission: 9th Shuttle-Mir Mission (STS-91)

Period: 9.8 days

(18:10 June 2 to 14:03 June 12, 1998)

Route: about 400 km in altitude

x 51.65 degrees in inclination



等身大人体ファントムと線量計の配置

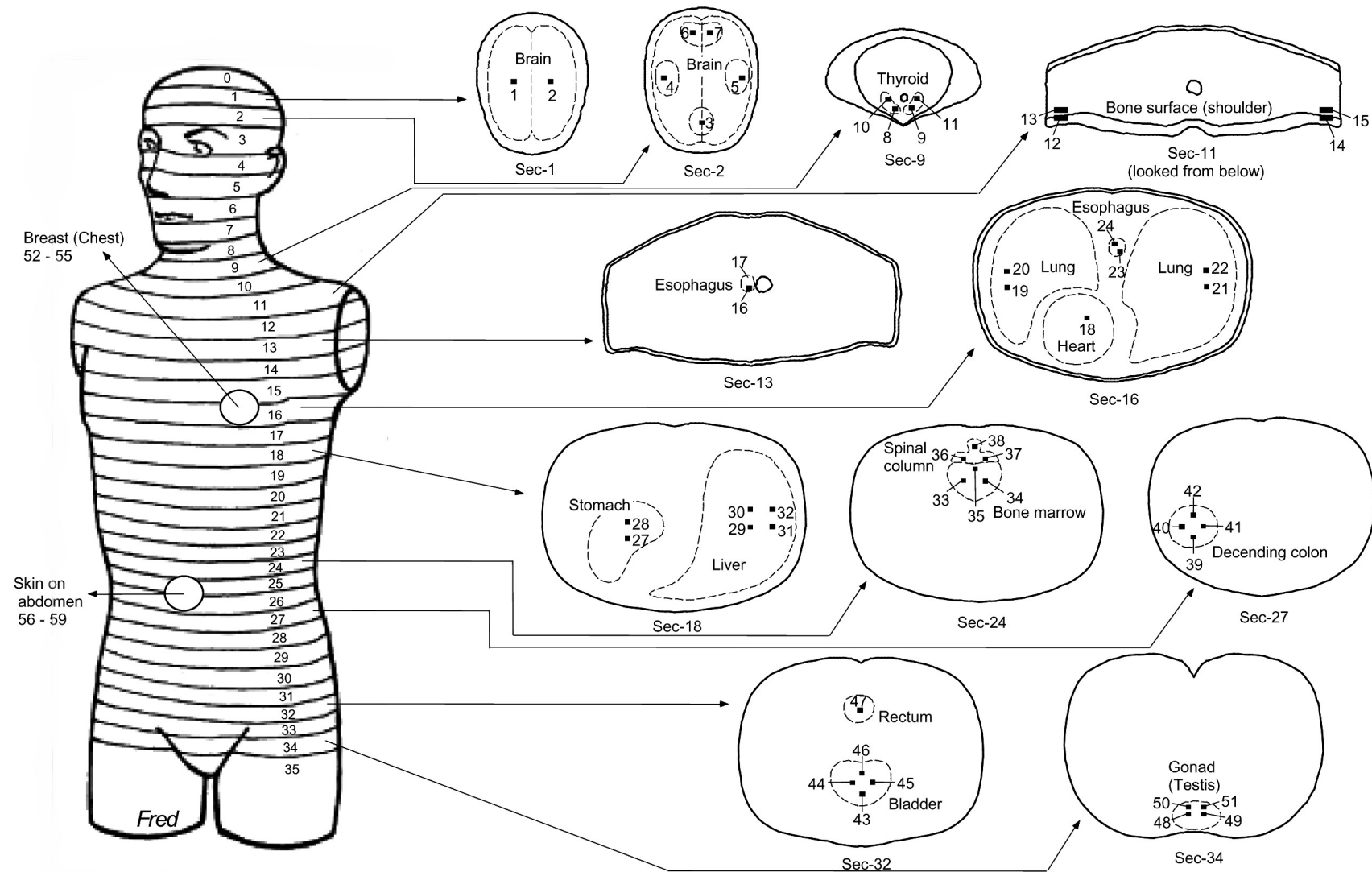
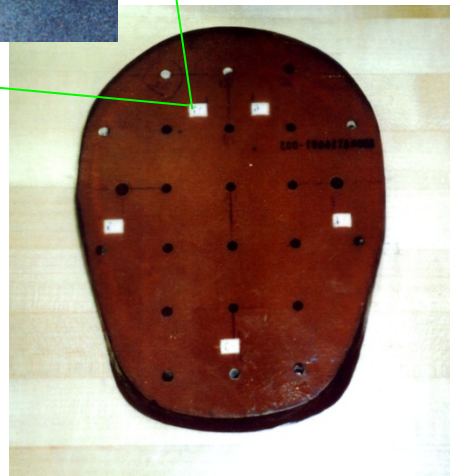
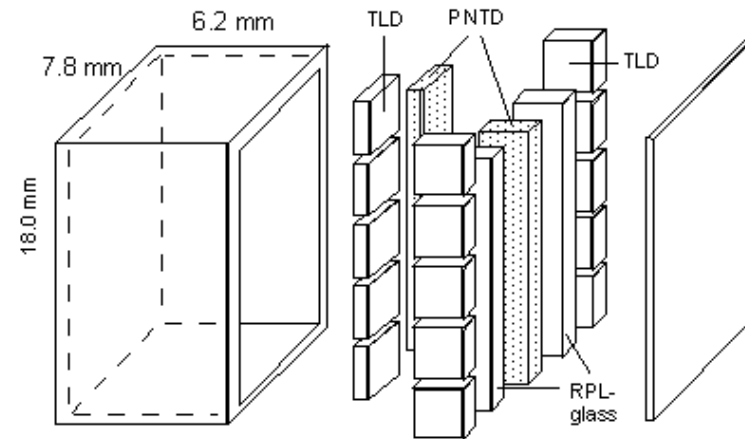
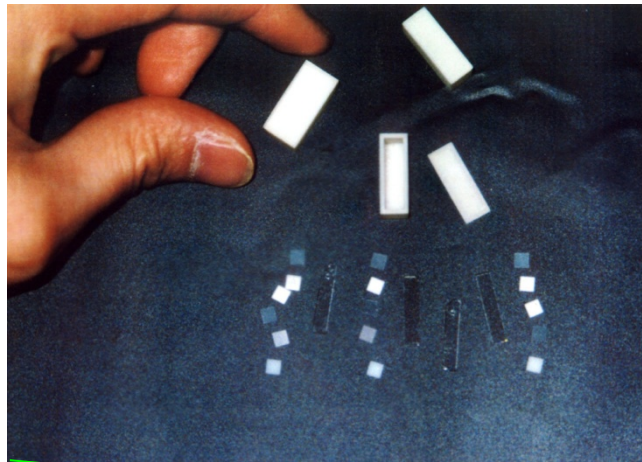


Fig. An illustration of arrangement of dosimeter packages in the phantom. The package includes small integrating dosimeters: TLDs, RPL-glasses and CR-39 track detectors.

使用した受動型積算線量計

Several types of thermoluminescence detectors (TLD), RPL glass and highly sensitive plastic nuclear track detectors (CR-39) were packed in to a case made of tissue-equivalent resin.



線量計の校正

NIRS
HIMAC

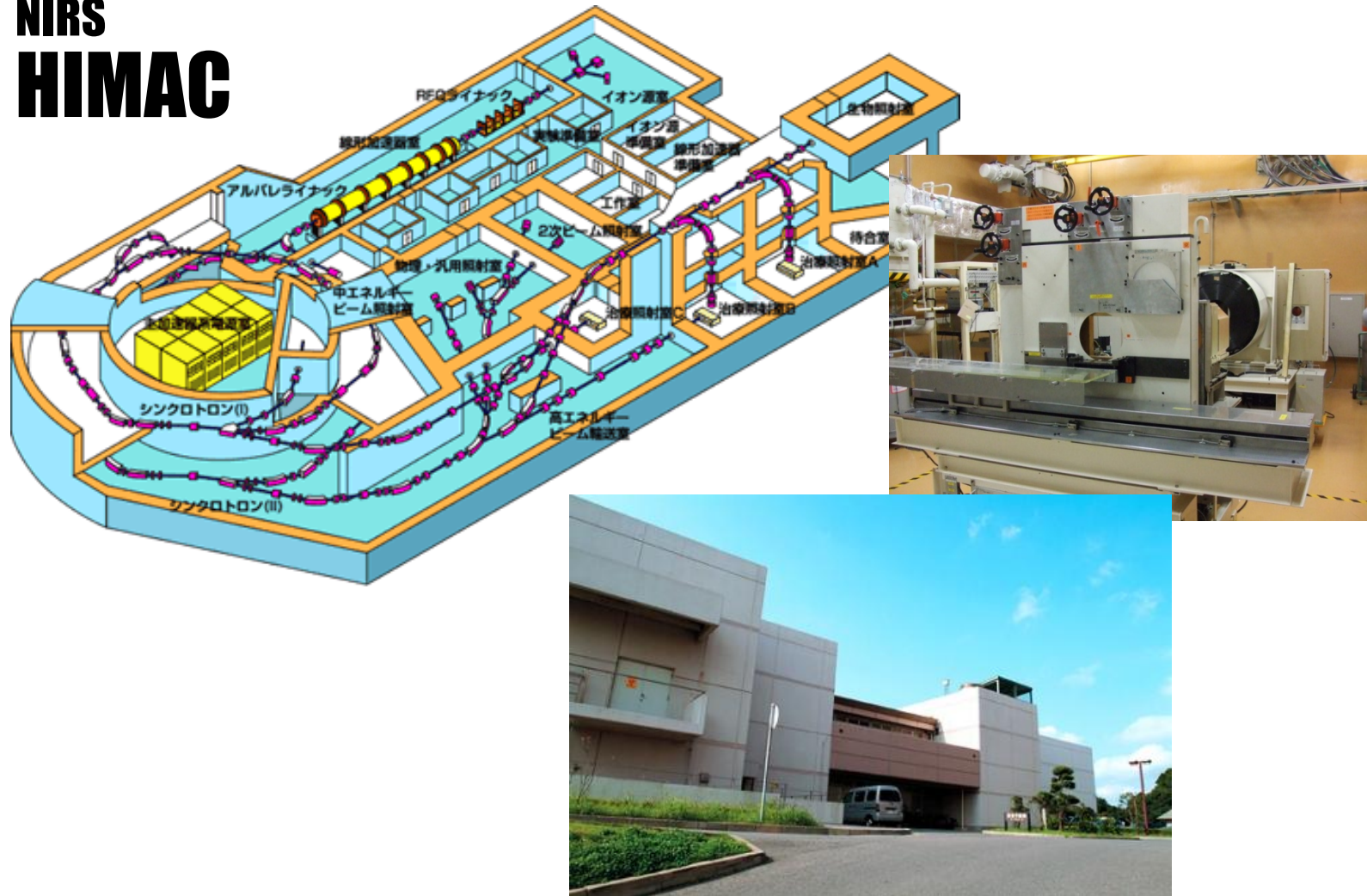


Fig. The Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) of the National Institute of Radiological Sciences.

校正データ

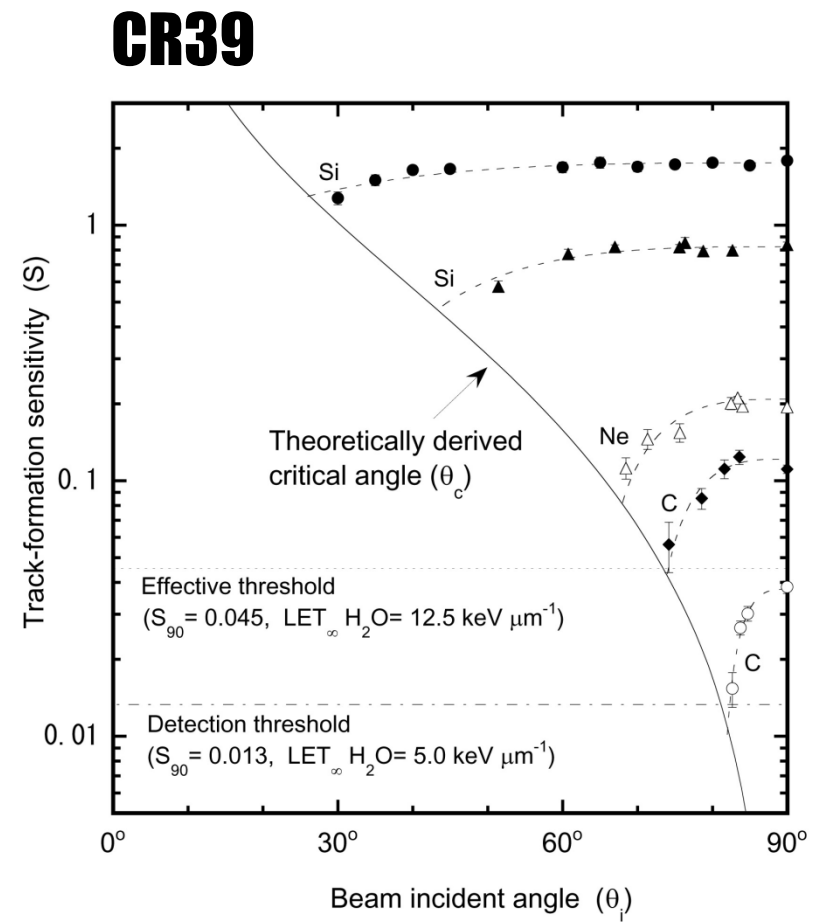
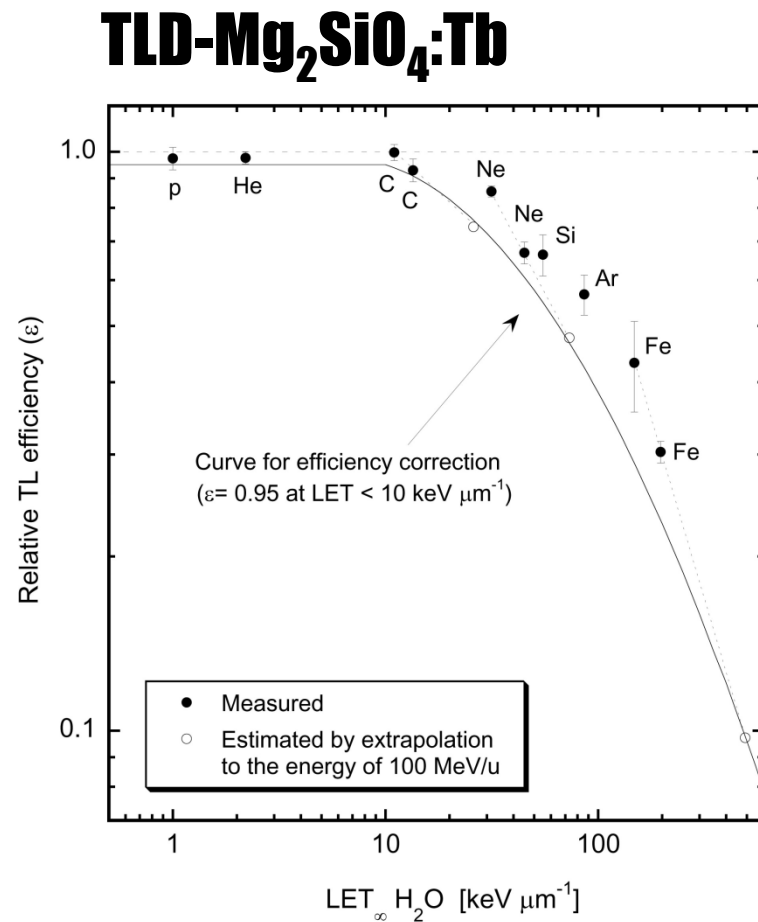


Fig. Dosimeter calibration data obtained with energetic heavy ion beams at NIRS-HIMAC; the left plots are the relative thermoluminescence sensitivities of TLD-Mg₂SiO₄:Tb versus LET and the right plots are angle dependent track formation sensitivities of CR-39.

測定結果：1990年勧告に基づく線量

Table 1. The values of organ absorbed dose, dose equivalent, and effective quality factor and effective dose obtained for the phantom torso experiment in the 9.8-day STS-91 mission. Measurements were made with combined CR-39/TLD methodology.

Organ/ Tissue ^a	Absorbed dose (D _T) [mGy (H ₂ O)] ^b	Organ/tissue dose equivalent (H _T) [mSv] ^b	Effective quality factor (Q _c)	Tissue weighting factor (w _T)	H _T × w _T ^b
Skin	2.2 ± 0.17	4.5 ± 0.05	2.0 ± 0.16	0.01	0.05 ± 0.001
Thyroid	2.2 ± 0.12	4.0 ± 0.21	1.9 ± 0.16	0.05	0.20 ± 0.011
Bone surface	2.7 ± 0.24	5.2 ± 0.22	1.9 ± 0.12	0.01	0.05 ± 0.002
Esophagus	2.1 ± 0.13	3.4 ± 0.49	1.7 ± 0.17	0.05	0.17 ± 0.024
Lung	2.1 ± 0.13	4.1 ± 0.76	2.1 ± 0.20	0.12	0.53 ± 0.091
Stomach	2.1 ± 0.13	3.8 ± 0.94	1.8 ± 0.50	0.12	0.52 ± 0.113
Liver	2.1 ± 0.13	3.9 ± 0.51	1.7 ± 0.33	0.05	0.20 ± 0.026
Bone marrow	2.1 ± 0.13	4.0 ± 0.40	1.9 ± 0.14	0.12	0.41 ± 0.048
Colon	2.1 ± 0.13	3.5 ± 0.61	2.2 ± 0.44	0.12	0.43 ± 0.050
Bladder	1.8 ± 0.16	3.6 ± 0.24	2.0 ± 0.25	0.05	0.18 ± 0.012
Gonad (Testis)	2.0 ± 0.05	4.7 ± 0.71	2.4 ± 0.27	0.20	0.94 ± 0.142
Breast (Chest)	2.3 ± 0.16	4.5 ± 0.11	1.9 ± 0.13	0.05	0.23 ± 0.006
Remainder	2.1 ± 0.15	4.0 ± 0.57	1.9 ± 0.22	0.05	0.20 ± 0.029
Effective dose [mSv]:					4.1 ± 0.22

Skin dose:
4.5 mSv
Effective dose:
4.1 mSv

測定結果：新しい組織加重係数の影響

Table 2 Organ dose equivalents weighted using the 2007 tissue weighting factors (w_T) and effective dose for the STS-91 phantom torso experiment.

Organ/Tissue	Organ dose equivalent (H_T) [mSv] ^b	2007 tissue weighting factor (w_T)	$H_T \times w_T$ using 2007 w_T	$H_T \times w_T$ using 1990 w_T
Skin	4.5 ± 0.05	0.01	0.05 ± 0.001	0.05 ± 0.001
Thyroid	4.0 ± 0.21	0.04	0.16 ± 0.008	0.20 ± 0.011
Bone surface	5.2 ± 0.22			0.05 ± 0.002
Esophagus	3.4 ± 0.49			0.17 ± 0.024
Lung	4.4 ± 0.76			0.53 ± 0.091
Stomach	4.3 ± 0.94			0.52 ± 0.113
Liver	4.0 ± 0.51			0.20 ± 0.026
Bone marrow	3.4 ± 0.40	0.12	0.41 ± 0.048	0.41 ± 0.048
Colon	3.6 ± 0.42	0.12	0.43 ± 0.050	0.43 ± 0.050
Bladder	3.6 ± 0.24	0.04	0.14 ± 0.010	0.18 ± 0.012
Gonad (Testis)	4.7 ± 0.71	0.08	0.38 ± 0.056	0.94 ± 0.142
Breast (Chest)	4.5 ± 0.11	0.12	0.54 ± 0.013	0.23 ± 0.006
Remainder	4.0 ± 0.57	0.12	0.48 ± 0.068	0.20 ± 0.029
Effective dose [mSv]			4.0 ± 0.19	4.1 ± 0.22

E (2007):
4.0 mSv
E (1990):
4.1 mSv

Note: The value shows a mean (m) $\pm$ one standard deviation (σ).

Si半導体検出器との比較 (1)

Table. Comparison of absorbed doses measured using TLD and CR39 with those using small Si diode detectors for the STS-91 phantom torso experiment.

Organ / Tissue	Measured absorbed dose for 9.8 days [mGy (H ₂ O)]		Ratio (Badhwar/ Yasuda)
	Yasuda et al. with CR-39/TLD	Badhwar et al. with Si diode	
Brain	2.4±0.20	2.23±0.09	0.93±0.09
Bone surface	2.7±0.24	2.16±0.08	0.80±0.08
Esophagus	2.1±0.13	1.71±0.06	0.81±0.06
Lung	2.1±0.31	1.92±0.15	0.91±0.15
Stomach	2.4±0.30	2.05±0.23	0.85±0.14
Liver	2.3±0.33	1.88±0.19	0.82±0.14
Bone marrow	1.8±0.10	1.75±0.13	0.97±0.09
Colon	1.7±0.22	1.71±0.24	1.01±0.19
Bladder	1.8±0.16	1.58±0.07	0.88±0.09
Gonad (Testis)	2.0±0.05	1.75±0.13	0.88±0.07

Badhwar et al. (2002)

Si半導体検出器との比較 (2)

Table. Comparison of the organ absorbed dose rates measured using small Si detectors to calculations using the HZETRN/QMSFRG model for the ISS Increment-2 phantom torso experiment in 2001.

Organ	Absorbed dose rate [mGy d ⁻¹]						Ratio (Model/ Expt.)
	Trapped radiation		GCR		Total		
	Expt.	Model	Expt.	Model	Expt.	Model	
Brain	0.051	0.066	0.076	0.077	0.127	0.143	1.13
Thyroid	0.062	0.072	0.074	0.077	0.136	0.148	1.09
Heart	0.054	0.061	0.075	0.076	0.129	0.137	1.06
Stomach	0.050	0.057	0.076	0.077	0.126	0.133	1.06
Colon	0.055	0.056	0.073	0.076	0.128	0.131	1.02

モデル計算との比較

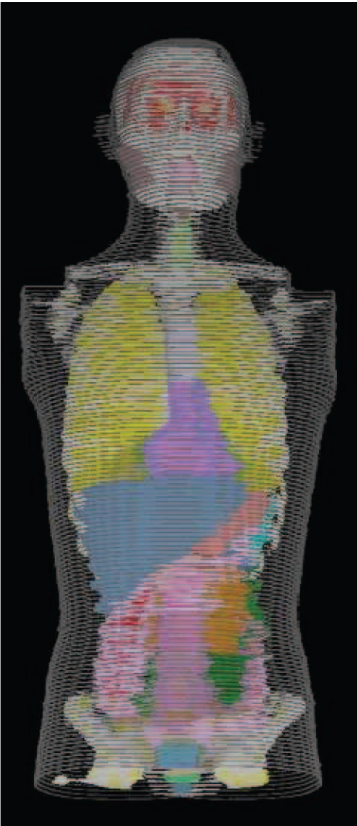
Table. Comparison of organ dose equivalents measured by combined TLD/CR-39 methodology with calculations using the HZETRN/QMSFRG transport model for the STS-91 phantom torso experiment.

Organ / Tissue	Organ dose equivalent for 9.8 days [mSv]		Ratio (Cucinotta/Yasuda)
	Measured by Yasuda et al.	Calculated by Cucinotta et al.	
Skin	4.5 ± 0.05	4.7	1.04
Thyroid	4.0 ± 0.21	4.0	1.00
Bone surface	5.2 ± 0.22	4.0	0.77
Esophagus	3.4 ± 0.49	3.7	1.09
Lung	4.4 ± 0.76	3.8	0.86
Stomach	4.3 ± 0.94	3.6	0.84
Liver	4.0 ± 0.51	3.7	0.93
Bone marrow	3.4 ± 0.40	3.9	1.15
Colon	3.6 ± 0.42	3.9	1.08
Bladder	3.6 ± 0.24	3.5	0.97
Gonad (Testis)	4.7 ± 0.71	3.9	0.83
Breast (Chest)	4.5 ± 0.11	4.5	1.00
Remainder	4.0 ± 0.57	4.0	1.00
Effective dose	4.1 ± 0.22	3.9	0.95

Cucinotta et al. (2008)

船外での測定結果

Table. Organ doses determined from the LiF TLD dose distribution measured inside a human phantom MATROSHKA outside the ISS Zvezda module

	Organ	Dose rate (mGy/day)
	Skin	0.94 (8)
	Eyeball, lens	0.54 (8), 0.58 (12)
	Salivary glands, breast	0.33 (7), 0.39 (10)
	Thymus, thyroid, trachea, brain	0.28–0.30 (6)
	Lungs, bones	0.26 (6), 0.28 (6)
	Esophagus, testes	0.24 (6), 0.26 (7)
	Colon, stomach, liver, red bone marrow, heart	0.22–0.24 (6)
	Kidneys, gall bladder, small intestine, spleen, pancreas, prostate	0.20–0.22 (6)

Note. Inset shows the organs of the Zubal phantom mapped and scaled into the voxel representation of MATROSHKA obtained from the CT slices. Values in parentheses specify measurement precision in percent.

これからの課題

太陽フレアへの対応

太陽表面での巨大な爆発(フレア)に伴い放出されたエネルギーの高い粒子はごく短時間で地球磁気圏に達する。

宇宙放射線のエネルギースペクトル

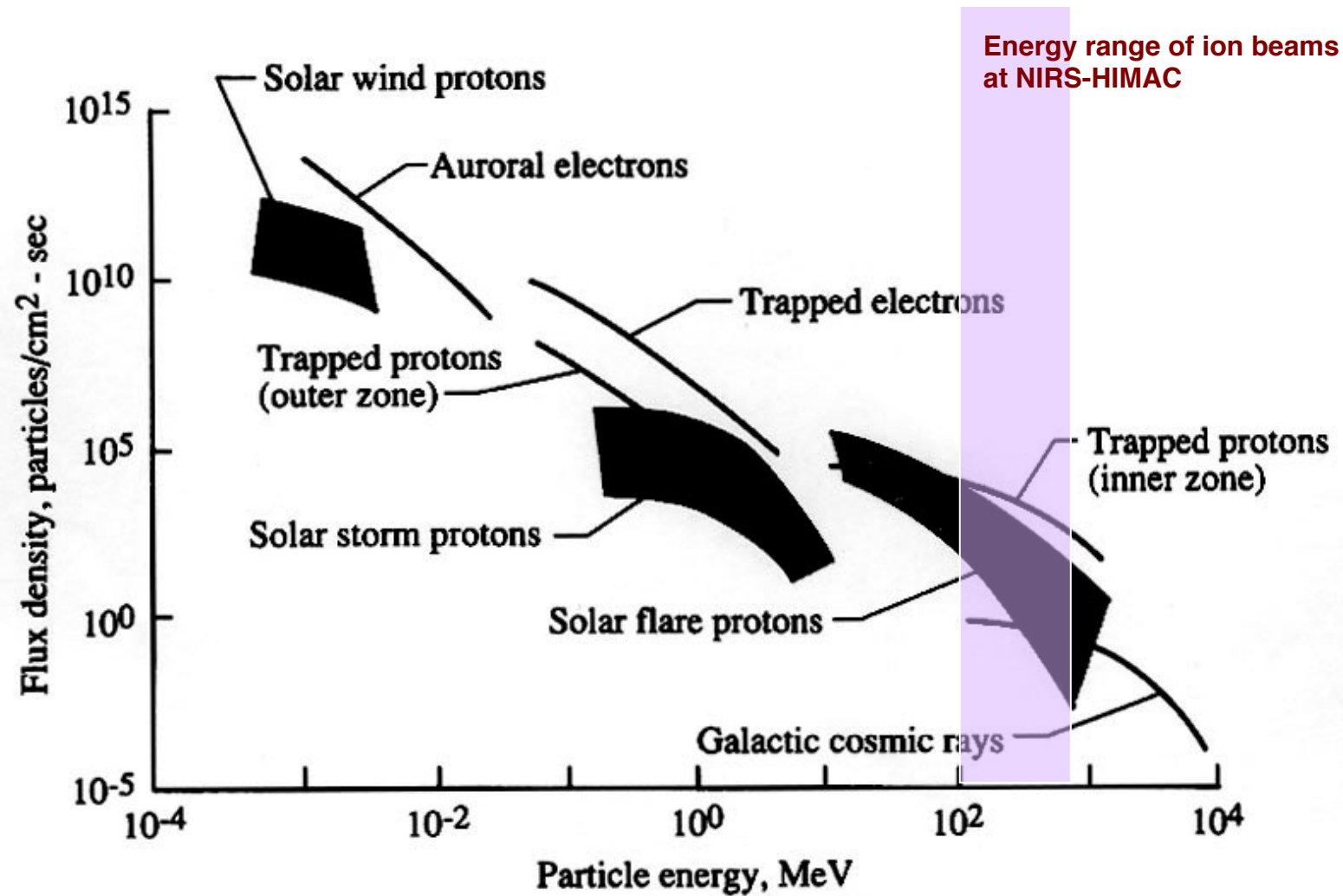


図. 宇宙放射線の代表的なエネルギースペクトル (Wilson et al., 1991).

大規模な太陽フレアの例

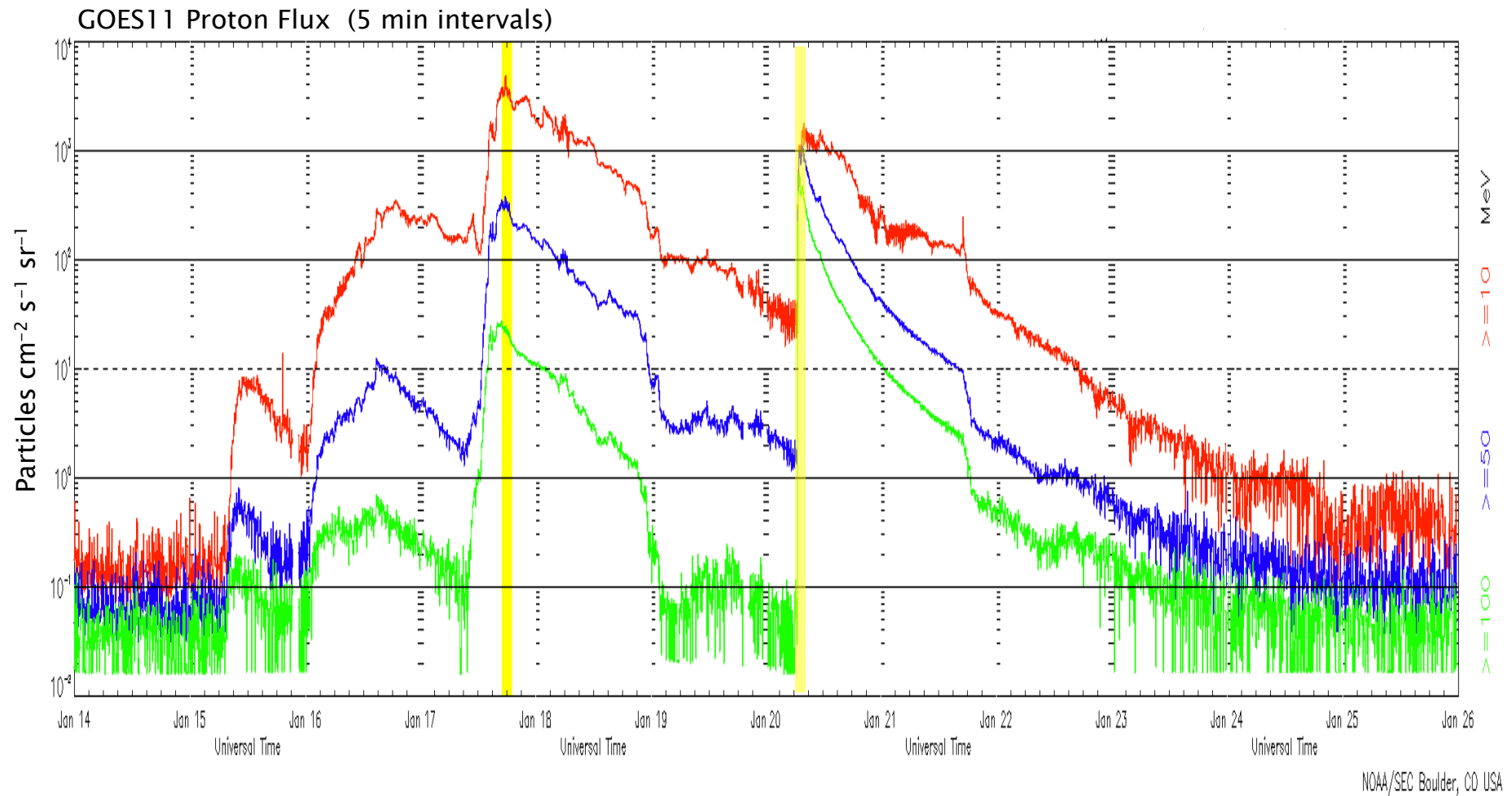


図. 2005年1月20日に発生した太陽フレアに伴い、上空約35,000kmで地球を周回する人工衛星(GOES衛星)で観測された高エネルギー陽子の増加.

Courtesy of NOAA/SEC

エネルギーの高いフレア粒子

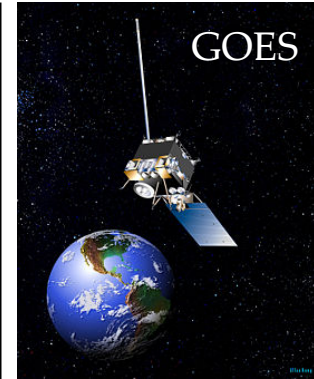
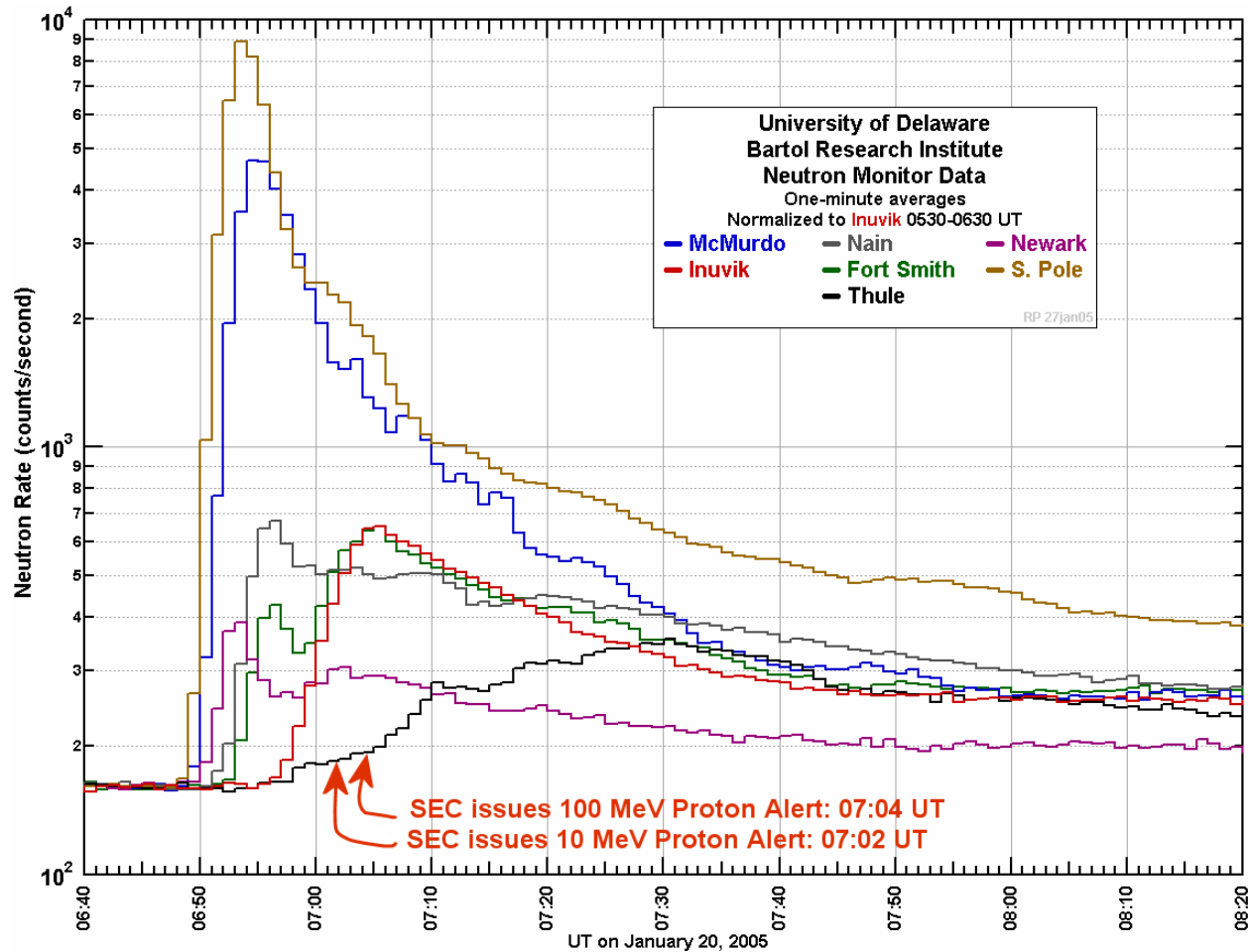


Fig. Neutron monitor data in the GLE on 20 January 2005 GLE. The GLE started by 14 minutes earlier than the SEC proton alert.

Courtesy of John W. Bieber, Bartol Research Institute

地球磁場の効果

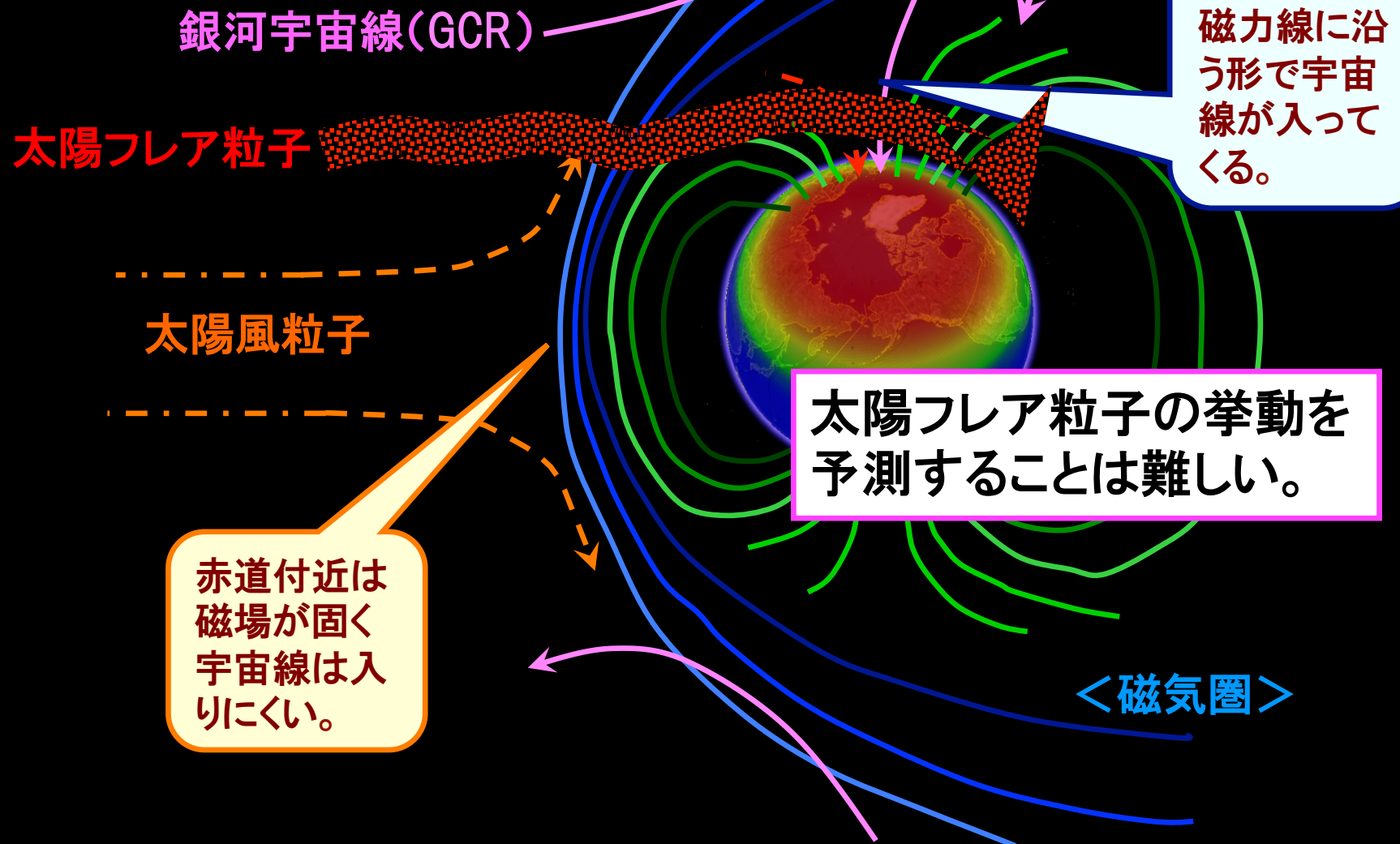


図. 地球周辺の磁場環境 (イメージ).

太陽フレアによる付加

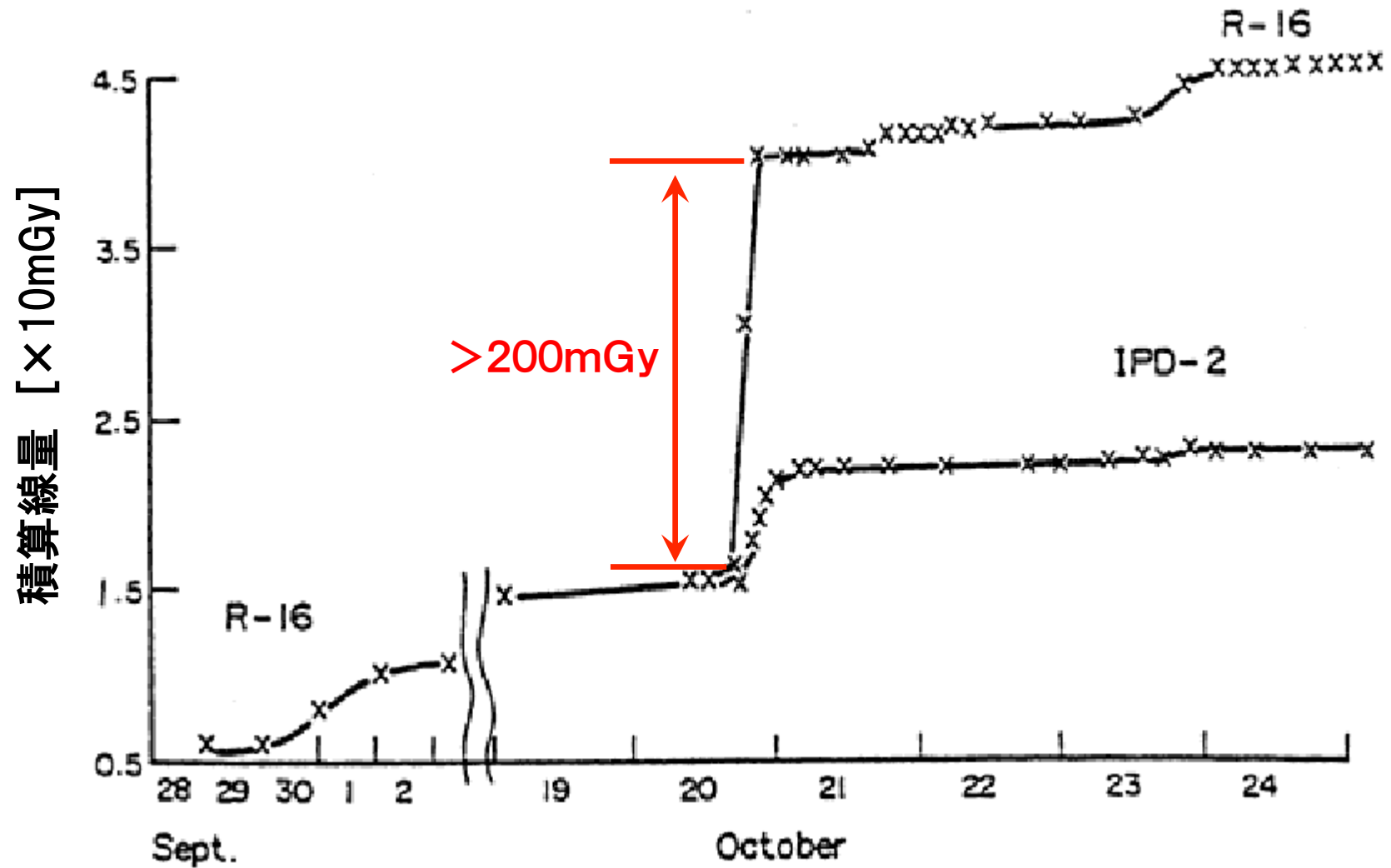


図. 1989年10月の巨大な太陽フレアの発生時にロシア・宇宙ステーションMIRで観測された積算線量の急激な上昇(courtesy of S. Yabe, JAXA).

太陽フレアによる被ばく

表. 国際宇宙ステーション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 Shizu Yabe, JAXA

遮蔽物の効果

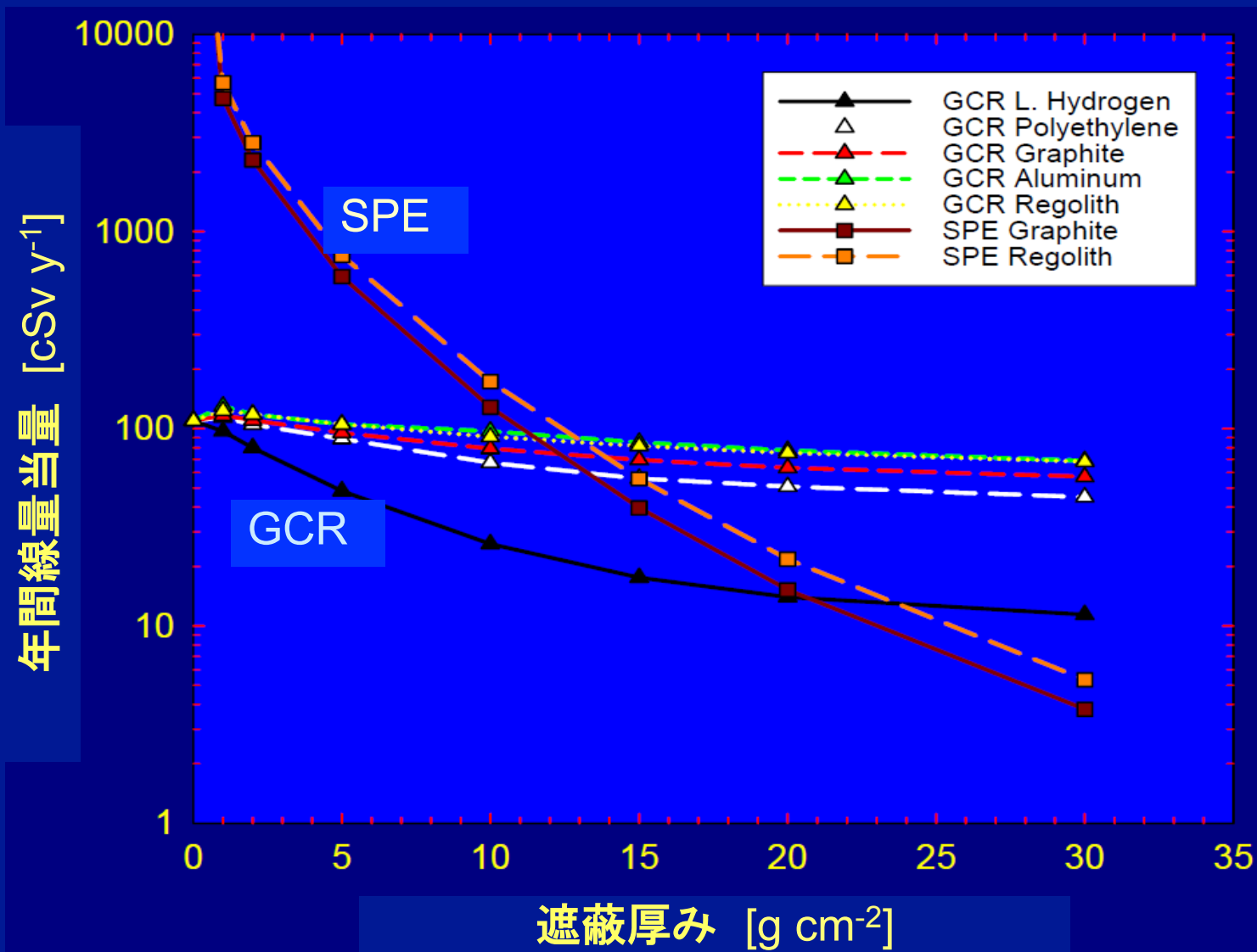
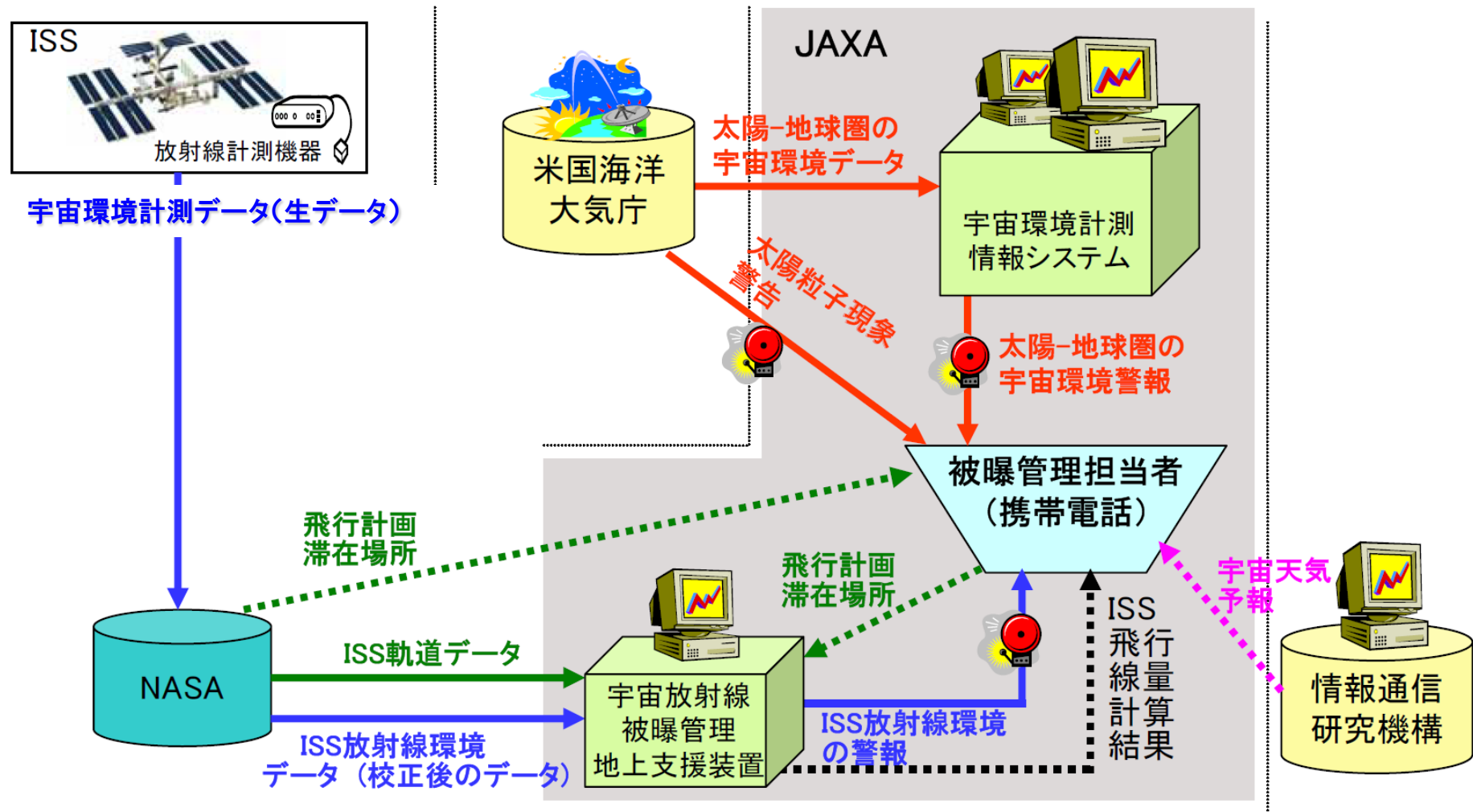


図. 各種材質の遮蔽物に関する厚さと線量の関係；SPEには1972年8月のフレアを想定している。

Courtesy of Francis A. Cucinotta

ISS宇宙飛行士の被ばく管理体制



Courtesy of Shizu Yabe



太陽フレアへの対処例

- ・ 2003年10月

線量率の高い時には、遮へいの厚い、ロシアモジュールの機尾あるいはNASA実験モジュールの就寝場所へ退避した。

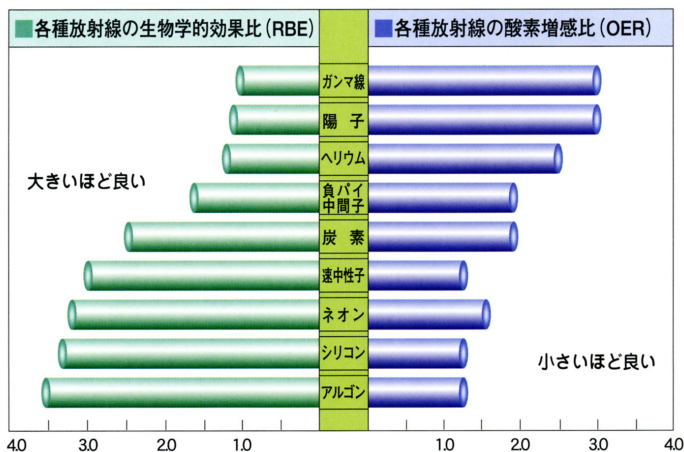
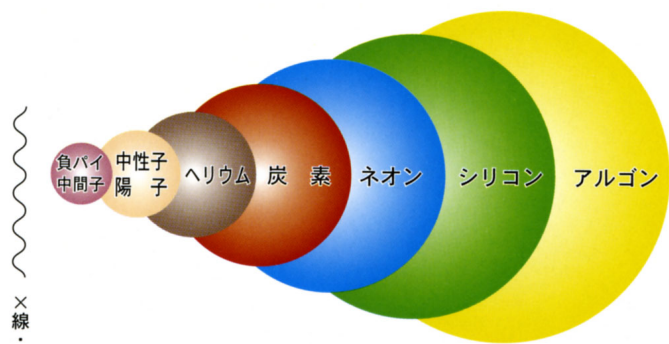
- ・ 2005年1月

就寝中想定以上に放射線レベルが増加する恐れがあった為、予防策として遮へいの厚い場所で眠るよう指示された。



リスク評価における不確かさ

重い粒子ほど生物効果は高い。



(放医研パンフレットより転載)

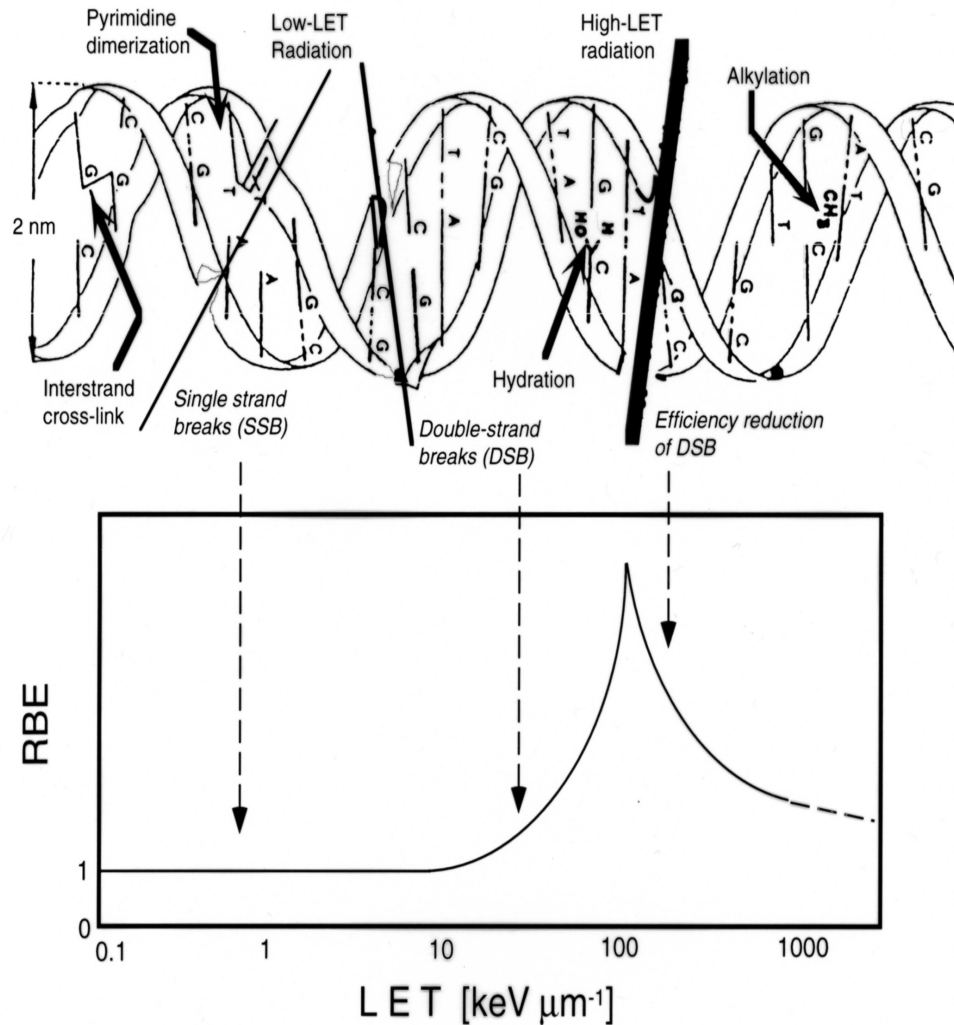


図. DNA切断と生物効果(RBE)との関係.

生物反応の複雑さ

例えば、核分裂中性子の生物影響には逆線量率効果が観られる。

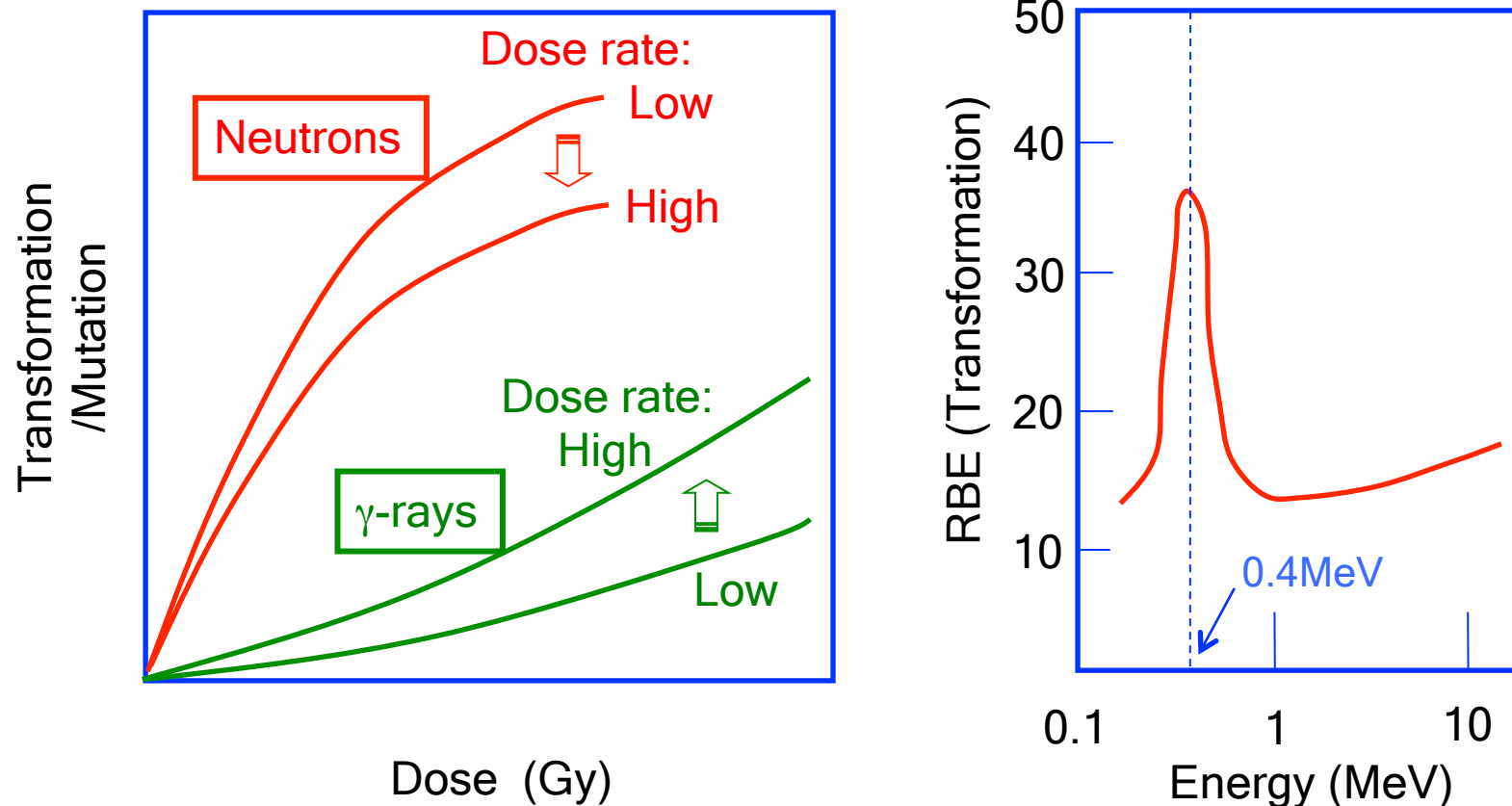
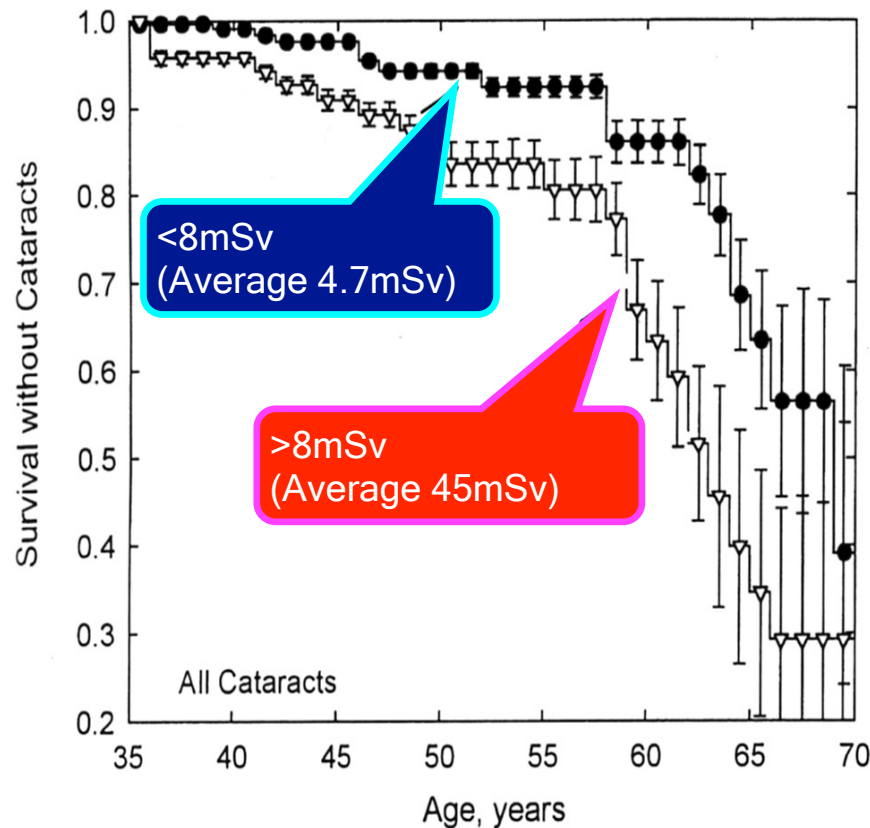


図. 中性子の逆線量率効果の模式的パターン(左)とマウス細胞のトランスフォーメーションRBEに観られたエネルギー依存性(右; Miller, 1991).

白内障の増加

比較的線量の高い宇宙飛行士に白内障の増加が観られる。



上図. 白内障(視力障害の無いケース)を発症しなかった宇宙飛行士の割合と年齢との関係. 水晶体の線量が8mSv未満(平均4.7mSv)と8mSv以上(同45mSv)の2群に分けて発症率を比較している. (Cucinotta et al., 2001)

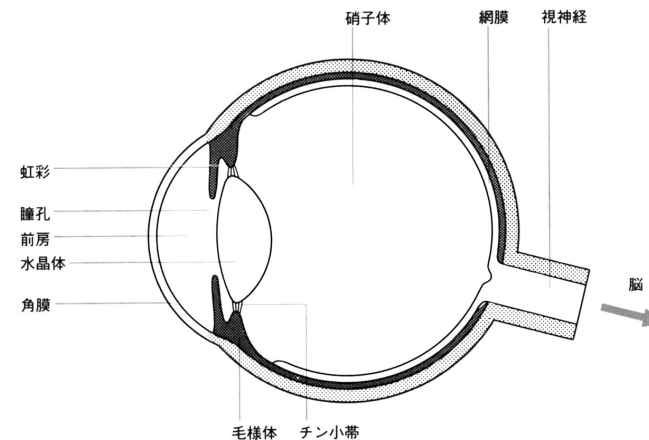


表 老人性白内障にかかっている割合

年齢(歳)	白内障の割合(%)
65 ~ 69	69.5
70 ~ 74	86.1
75 ~ 79	93.3
80 ~ 84	91.5
85 ~ 89	97.0
90 ~	100

注: 白内障の割合は1639眼に対するものである。

出典: 1982年の東邦大学戸張幾生教授の統計 (日本の眼科64; 213,1993)

心臓への影響

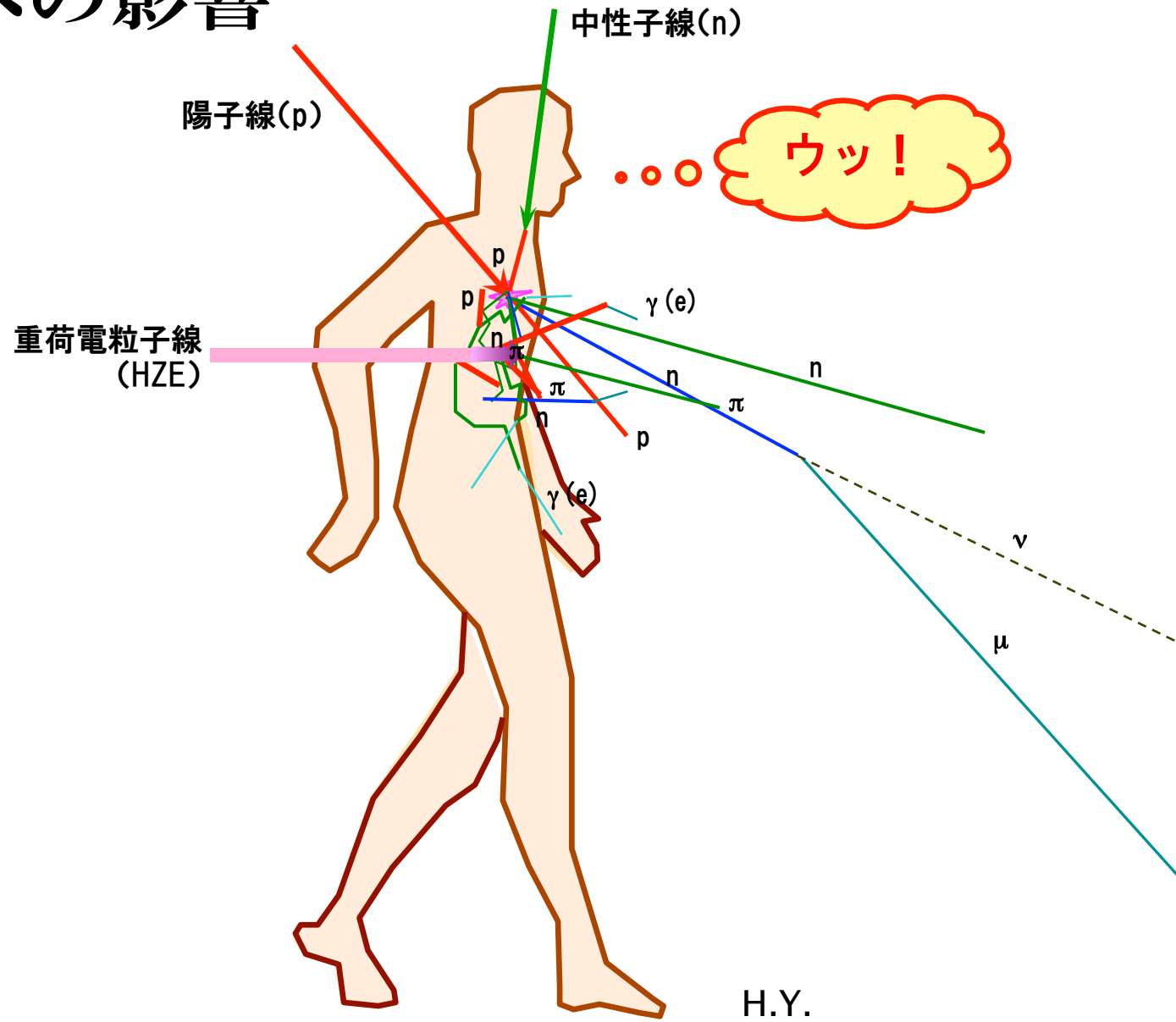


図. 生体内で発生する二次粒子のイメージ.

脳機能への影響

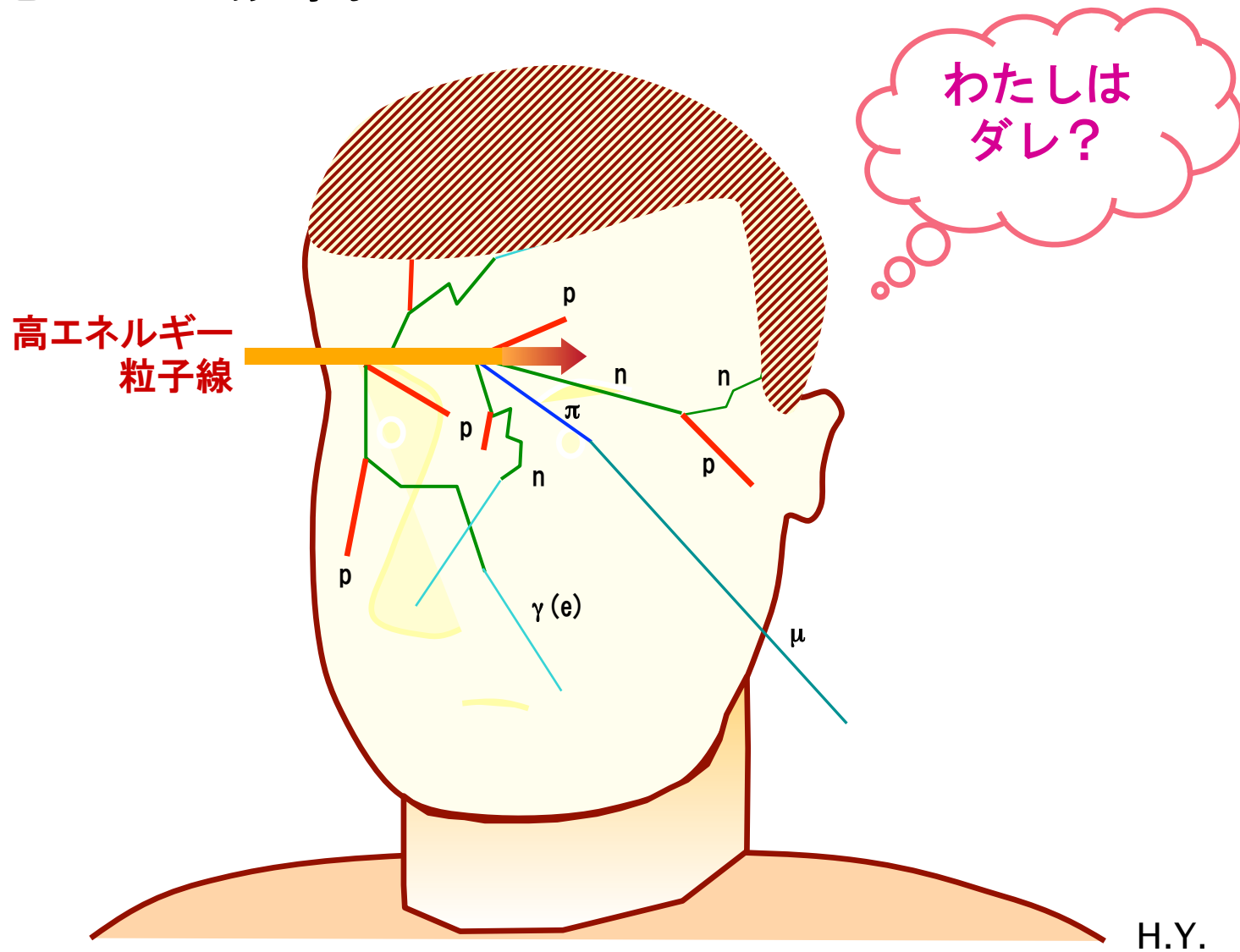
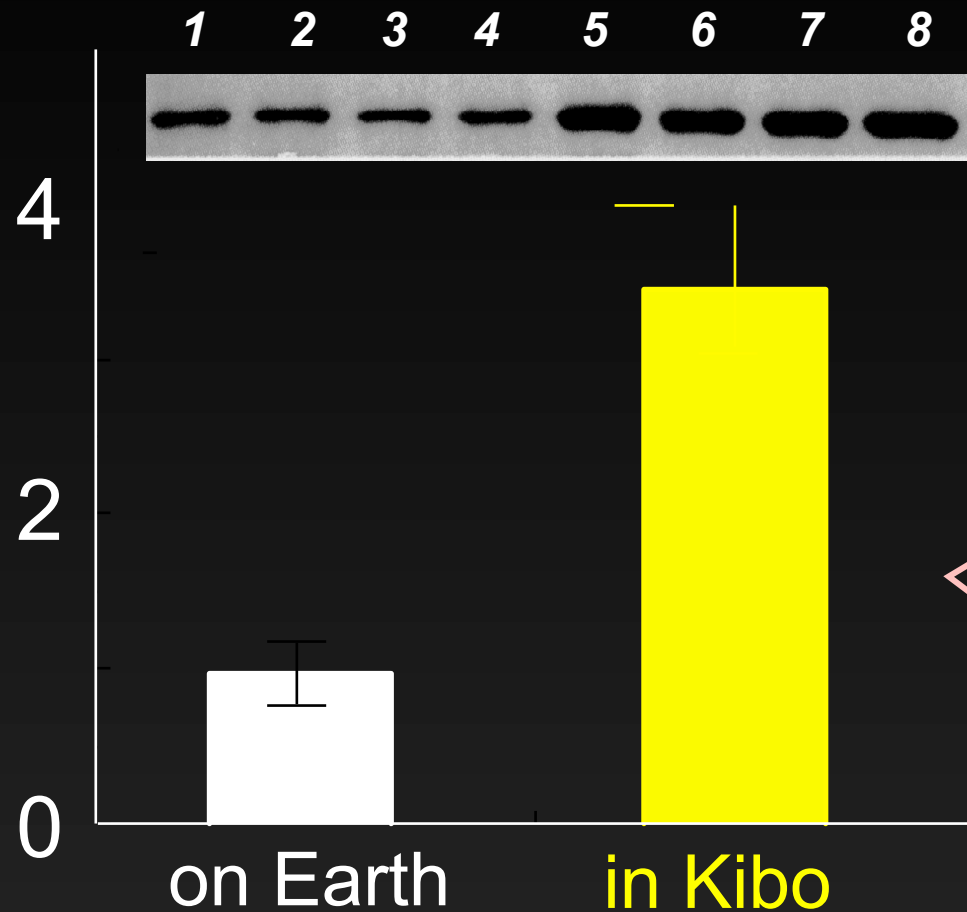


図. ヒトの頭に高エネルギー粒子が入射した場合のイメージ.

宇宙実験結果の解釈の難しさ

宇宙のサンプルに観られた変化は放射線に因るといえる？



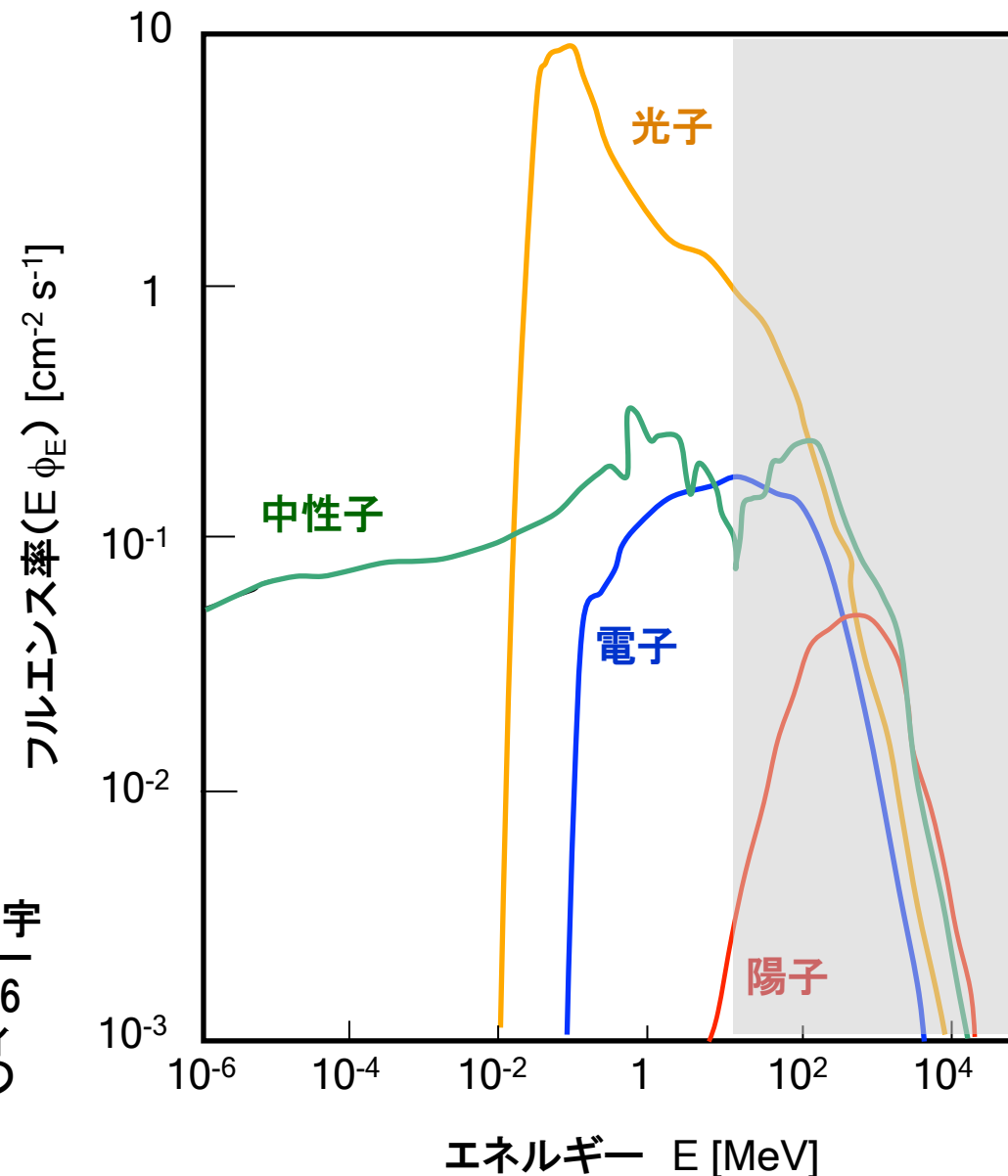
原因は...

- 放射線？
- 微小重力？
- 打ち上げ時の
負荷や振動？
- 気圧変化？
- 湿度低下？

地上対象実験の難しさ

宇宙線の粒子組成は複雑でエネルギー範囲は広く、校正場の存在しない高エネルギー成分が重要であるため、影響を厳密に評価するのは難しい。

右図. 航空機飛行高度における宇宙線各成分の推定エネルギー分布; 1995年5月、大気厚 246 g cm^{-2} 、カットオフリジディティ 4 GV での計算値(Heinrichらのグラフを参考に作成).



まとめ

- 地球の磁気圏と大気圏に囲まれて暮らす私たちは、宇宙線による被ばくを意識しないで済んでいる。
- 磁気圏を出るような長期の宇宙飛行には相当の被ばくのリスクが伴う。本人が納得していればOKというレベルではない。
- リスクを可能な限り正確に定量し、それを低減する為の徹底した努力が必要。

謝辞

本発表の情報収集にあたっては、以下に挙げる団体や個人をはじめとして、多くの方々の情報を参考にさせて頂きました。この場をお借りして深く謝意を表します。

- 文部科学省
- 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
- 米国航空宇宙局 (NASA)
- 甲斐倫明先生 (大分看護科学大学)
- 柴田一成先生 (京都大学)
- 放医研の同僚 他

H. Yasuda

平成23年3月5日
京都大学宇宙総合ユニット 第4回シンポジウム
“宇宙で被ばくする放射線の量とそのリスク”
保田 浩志（放射線医学総合研究所）



END

