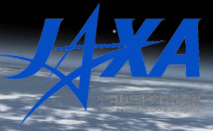




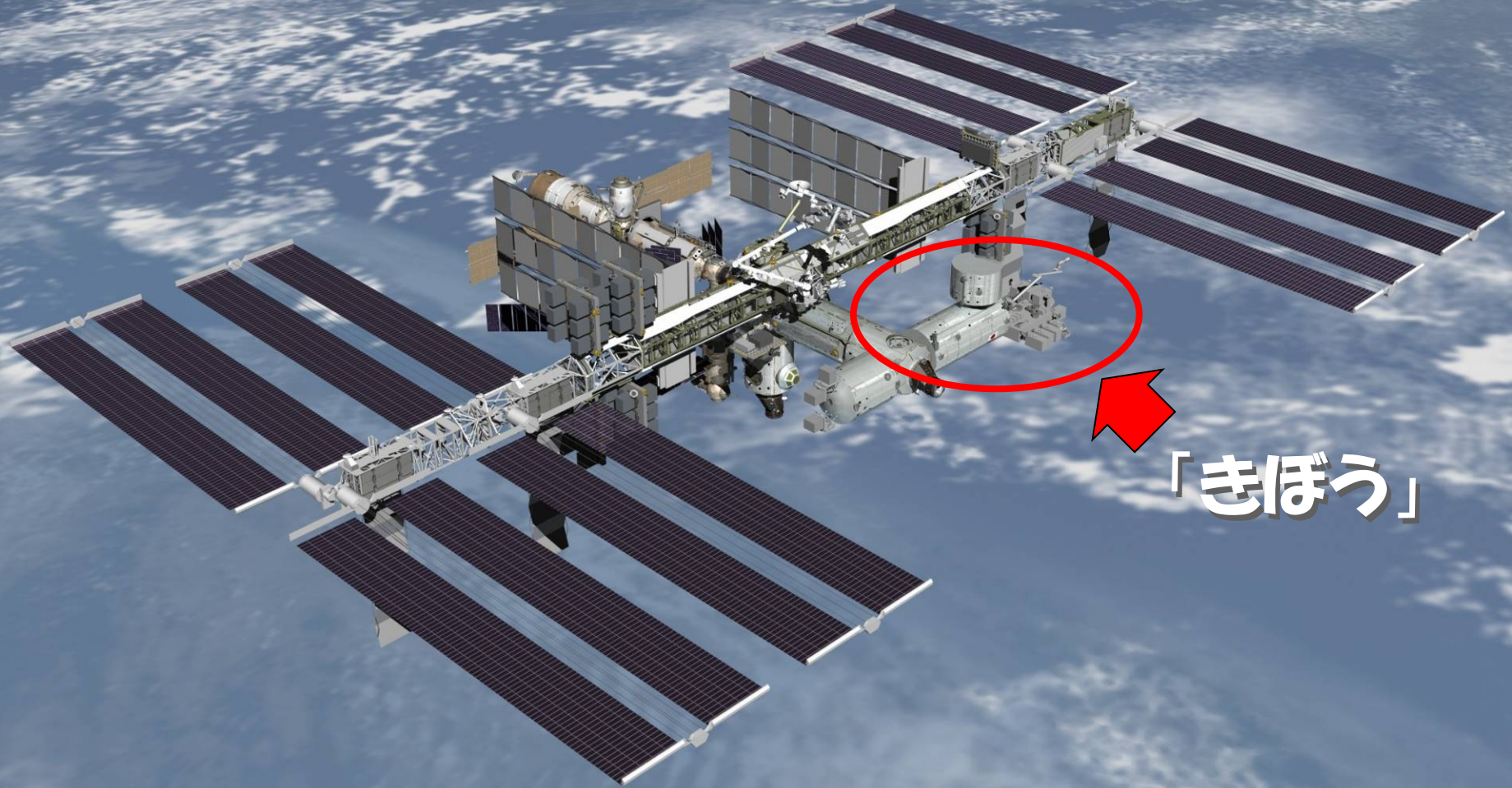
第9回宇宙天気予報ユーザーズフォーラム

宇宙飛行士の放射線被ばく管理と 宇宙天気予報

平成26年3月20日
宇宙航空研究開発機構
宇宙飛行士運用技術部
佐藤 勝



国際宇宙ステーション



「きぼう」

今、こんな形で飛んでいます！！

船内保管室

船内実験室

ロボットアーム

10m

4.4m

エアロック

船外パレット

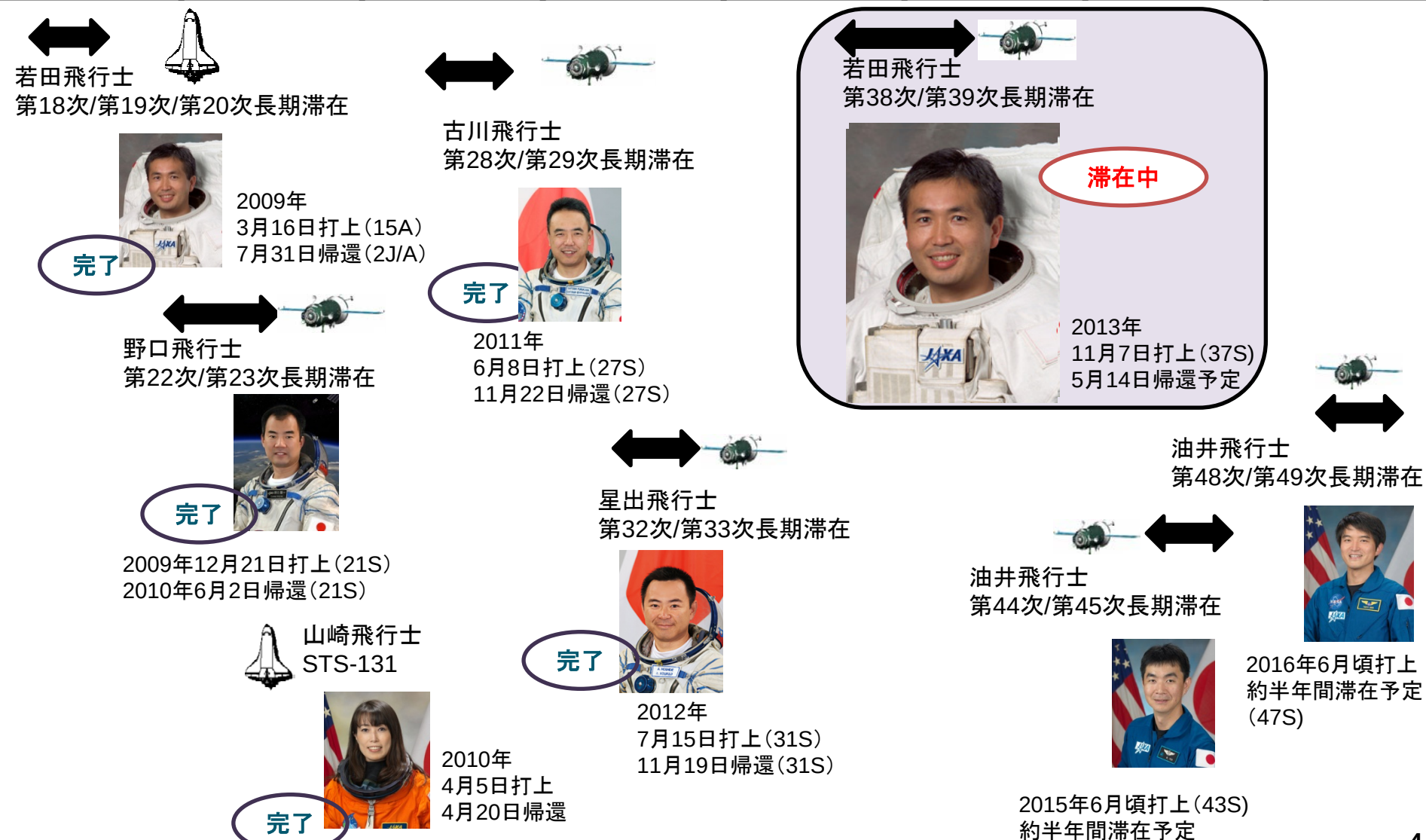
11.2m

総重量 47トン

船外実験プラットフォーム

日本人宇宙飛行士のISS長期滞在の計画

2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



低地球軌道の宇宙放射線環境（高度300～500km）

3種類の一次宇宙線源があり、これらが船壁や搭載物を通過して船内へ入射する。

太陽粒子線

陽子・電子 90%
He原子核 数%
重荷電粒子 (>He)



国際宇宙ステーション

銀河宇宙線

陽子・電子 90%
He原子核 10%弱
Li～Fe原子核
 γ , X線等の電磁波

捕捉粒子線

バンアレン帯

内帯 = 主に陽子
外帯 = 主に電子



スペースシャトル



: 国際宇宙ステーション・スペースシャトルの軌道
高度300～500km(低地球軌道)

出典: JAXA 宇宙環境利用センター
(JAXA ホームページ)

ISS: 地球の磁気により、よほど大きな太陽フレアでなければ被ばく線量に寄与しない。

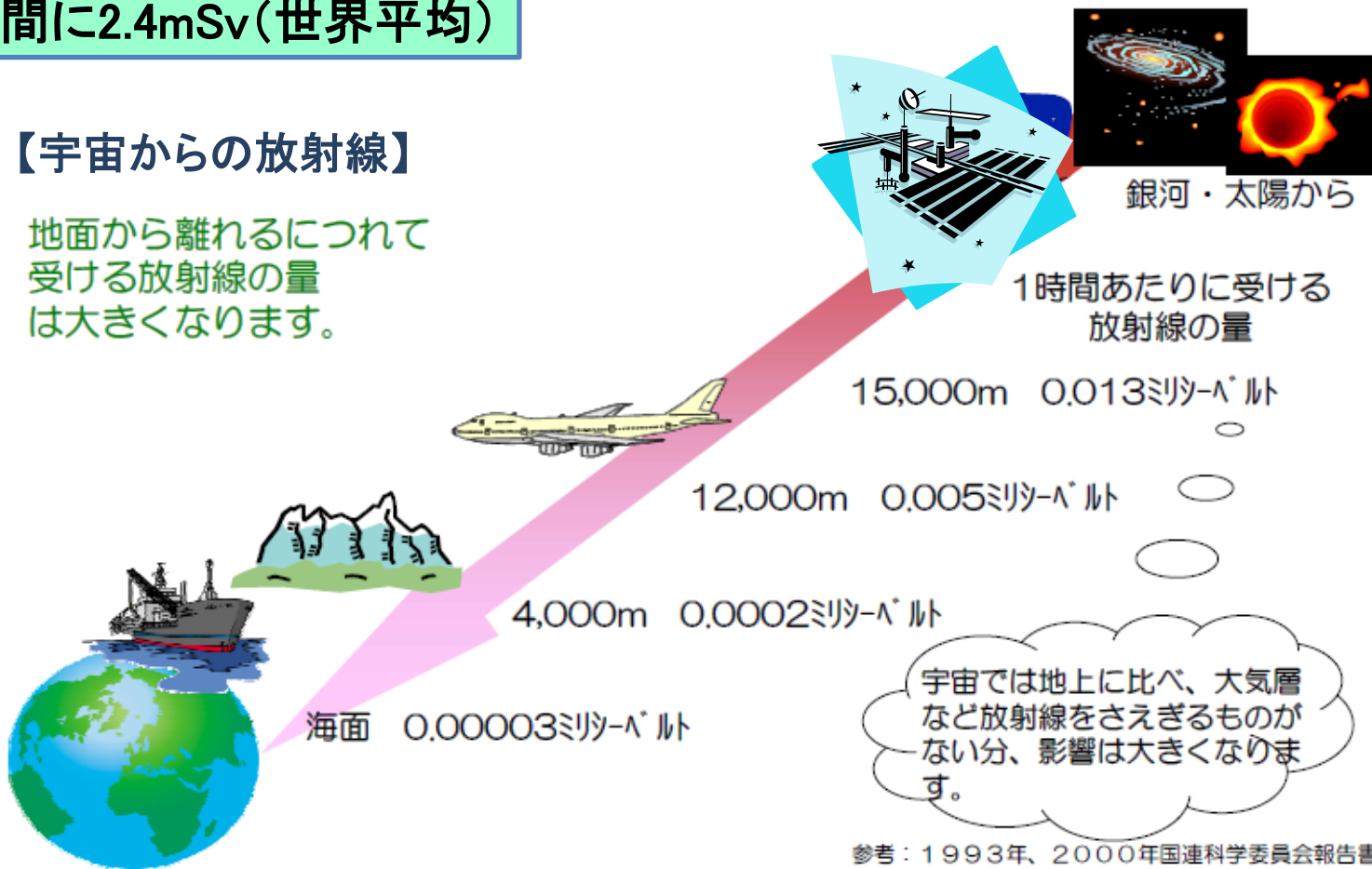
ISSでの宇宙放射線の被ばく量

地上の自然放射線
1年間に2.4mSv(世界平均)

ISS: 0.02~0.04mSv/hr (0.5~ 1mSv / day)

【宇宙からの放射線】

地面から離れるにつれて
受ける放射線の量
は大きくなります。



ISS滞在中の1日当たりの放射線量は、地上での約半年分に相当

JAXAにおける線量制限値

○宇宙飛行士の宇宙放射線被ばくの線量制限値は、国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告をもとにJAXAで独自に設定 (ICRP2007年勧告に基づき2013年6月に改正)

ISS搭乗宇宙飛行士の生涯実効線量制限値 (Sv)

初めて宇宙飛行を行った年齢	男性の制限値	女性の制限値
27～30歳	0.6	0.5
31～35歳	0.7	0.6
36～40歳	0.8	0.65
41～45歳	0.95	0.75
46歳以上	1.0	0.8

ISS搭乗宇宙飛行士の組織等価線量制限値 (Sv)

組織・臓器	1週間	1年間	生涯
骨髄	—	0.5	—
水晶体	0.5	2	5
皮膚	2	7	20
精巣	—	1	—

寄与生涯がん死亡確率 (生涯にわたってがんで死亡する確率の放射線被ばくによる増加分) に基づき設定。

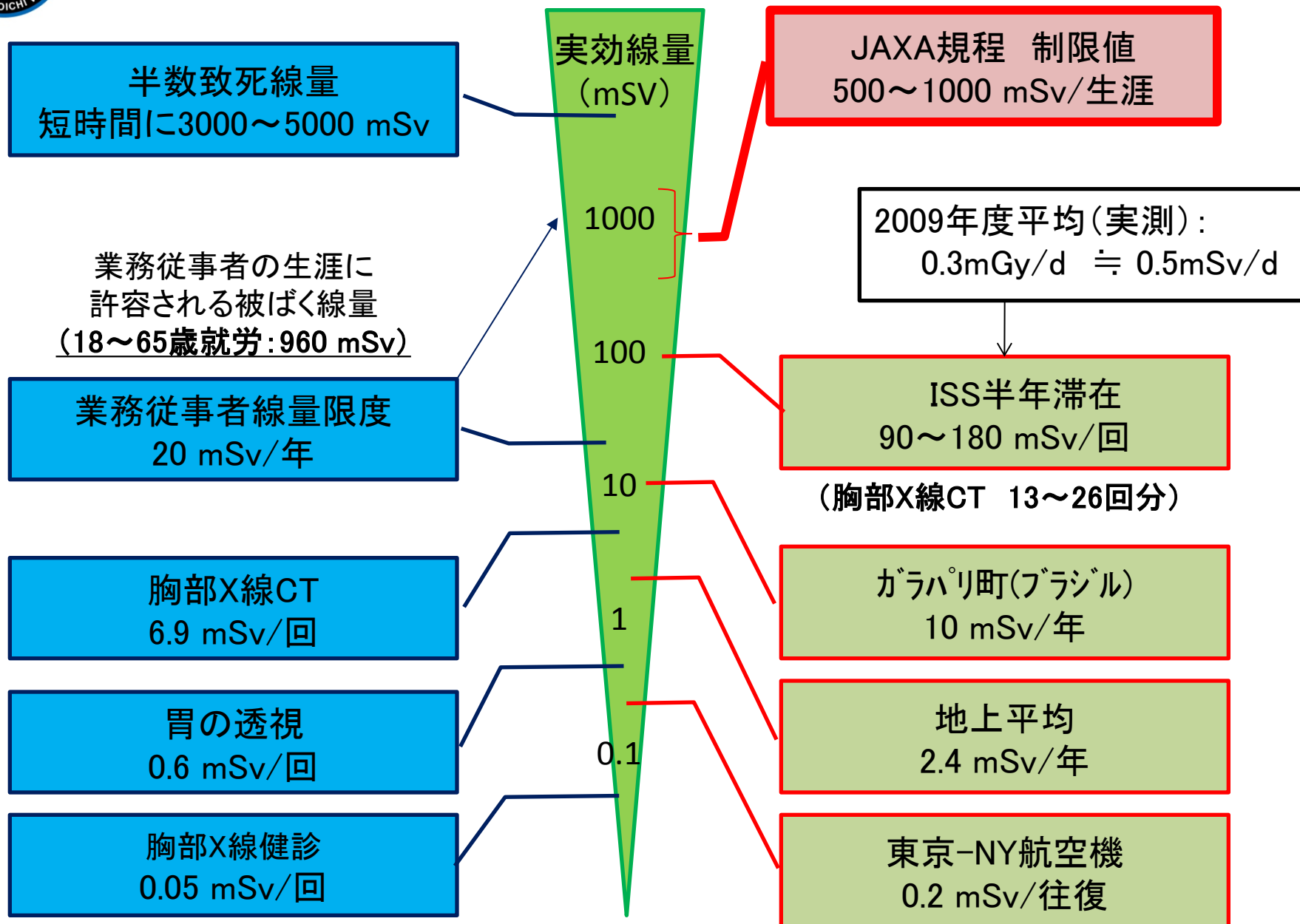
- 想定条件 (初飛行後3年に1回搭乗) で **3 %程度**
- 宇宙飛行以外の被ばくを考慮しても 5 %未満

(参考) 職業被ばく限度では3.6 % (5年平均で20 mSv/年、単年で50 mSv/年、18-65歳就業で最大960mSvの被ばくが許容される。)

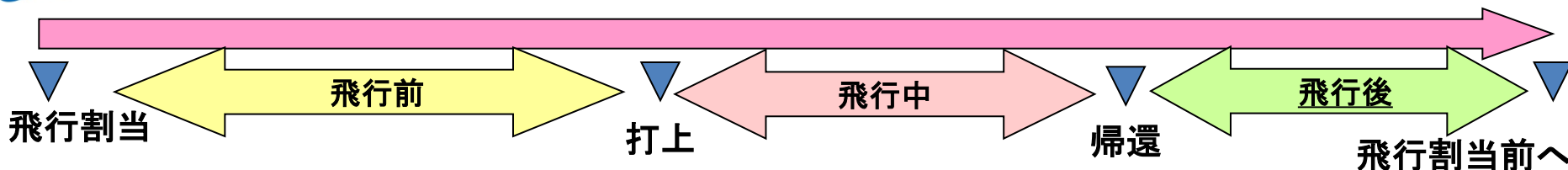
不可逆的な確定的影響を回避するため、実効線量制限値のみでは防護できない組織について、個別に制限値を設定。

影響発生 of しきい値以下に管理。

放射線被ばく量のイメージ (概要)



宇宙飛行士の放射線被ばく管理作業



飛行前線量評価

- 飛行前被ばく線量予測値の算定

宇宙飛行士へのリスク説明

個人線量計(JaCPD*)の準備



宇宙放射線環境モニタリング

- 太陽フレア
- 太陽粒子現象
- 地磁気擾乱
- ISS内線量

飛行中線量評価

- 飛行中個人線量評価(1回／週)

異常時対応

- 異常時予測値算定実施

船外活動(EVA)時

- EVA中の宇宙天気予報の入手
- EVA前予測値算定
- EVA中太陽－地球圏の宇宙環境自動監視

飛行後線量評価

- 個人線量計の解析・評価

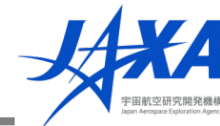
デブリーフィング

- 要改善事項の抽出

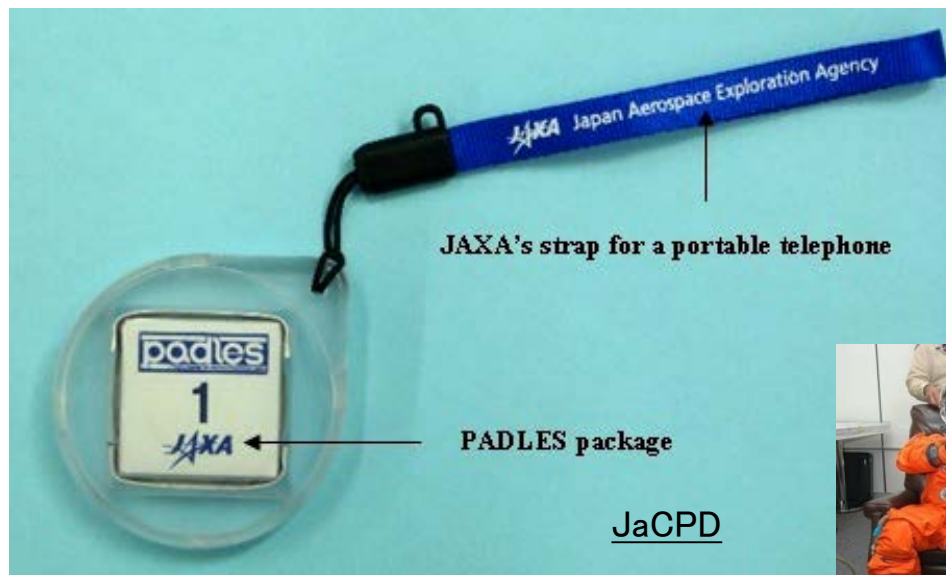
宇宙飛行士への結果説明



宇宙飛行士の個人被ばく線量計 (JaCPD)



- 宇宙飛行士の個人被ばく管理を行うため、船内・船外活動を通じたフライト中、宇宙飛行士は常時個人被ばく線量計(*)を携帯。
- 宇宙飛行士のISSへの搭乗割り当ては、被ばく制限値(生涯実効線量制限値)に対して、過去の宇宙飛行等の被ばく線量の累積によって決定。
- このため線量計には、高い測定精度が必要。



Muszaphar



若田



Yui



野口



土井



山崎



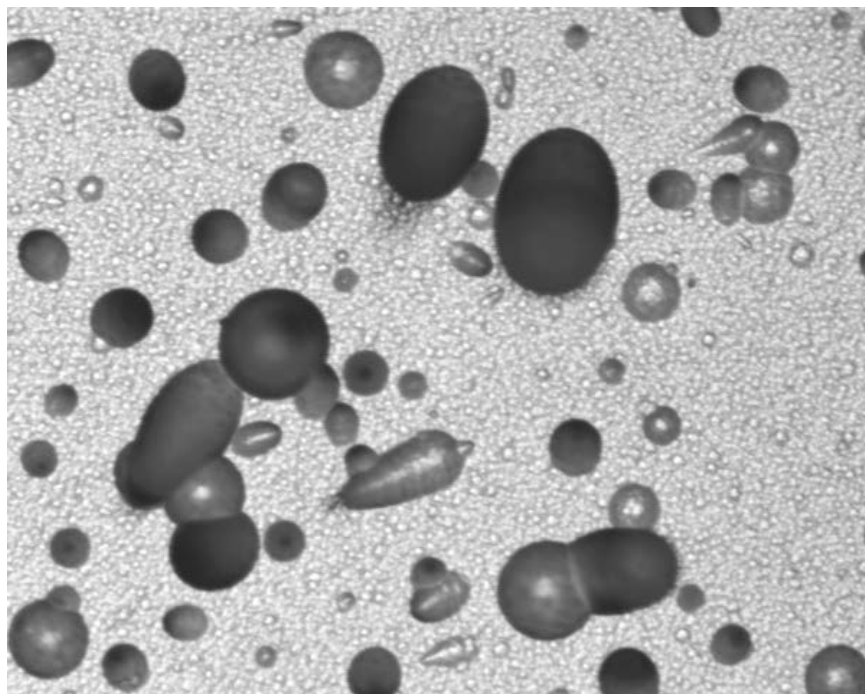
星出



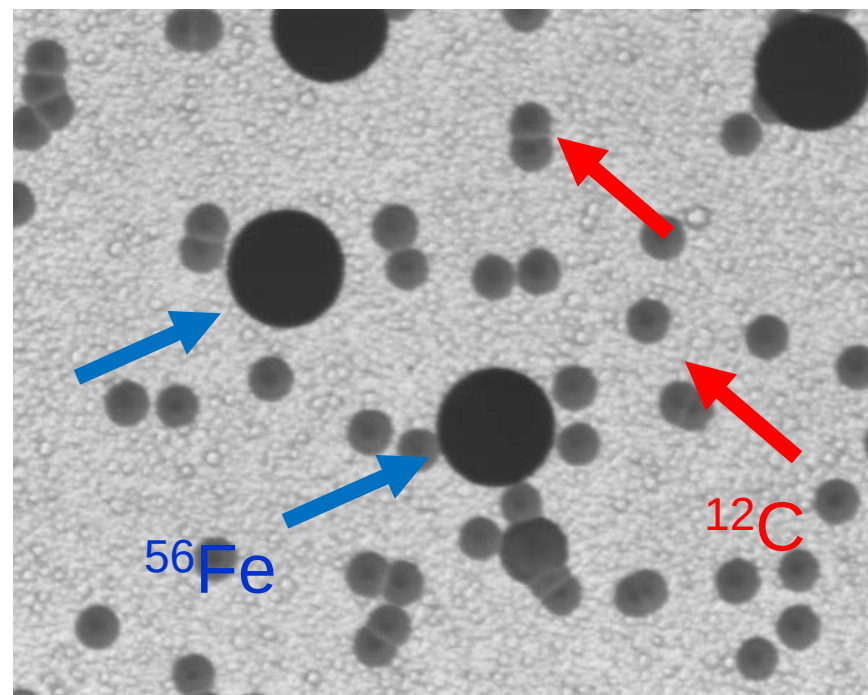
古川

宇宙放射線環境では、広いエネルギー領域の粒子線が、あらゆる方向から入射していることがわかる。

サービスモジュール船外に621日間搭載された
CR-39飛跡検出器 (宇宙での結果)



重粒子加速器HIMACで照射した
CR-39飛跡検出器 (地上での結果)



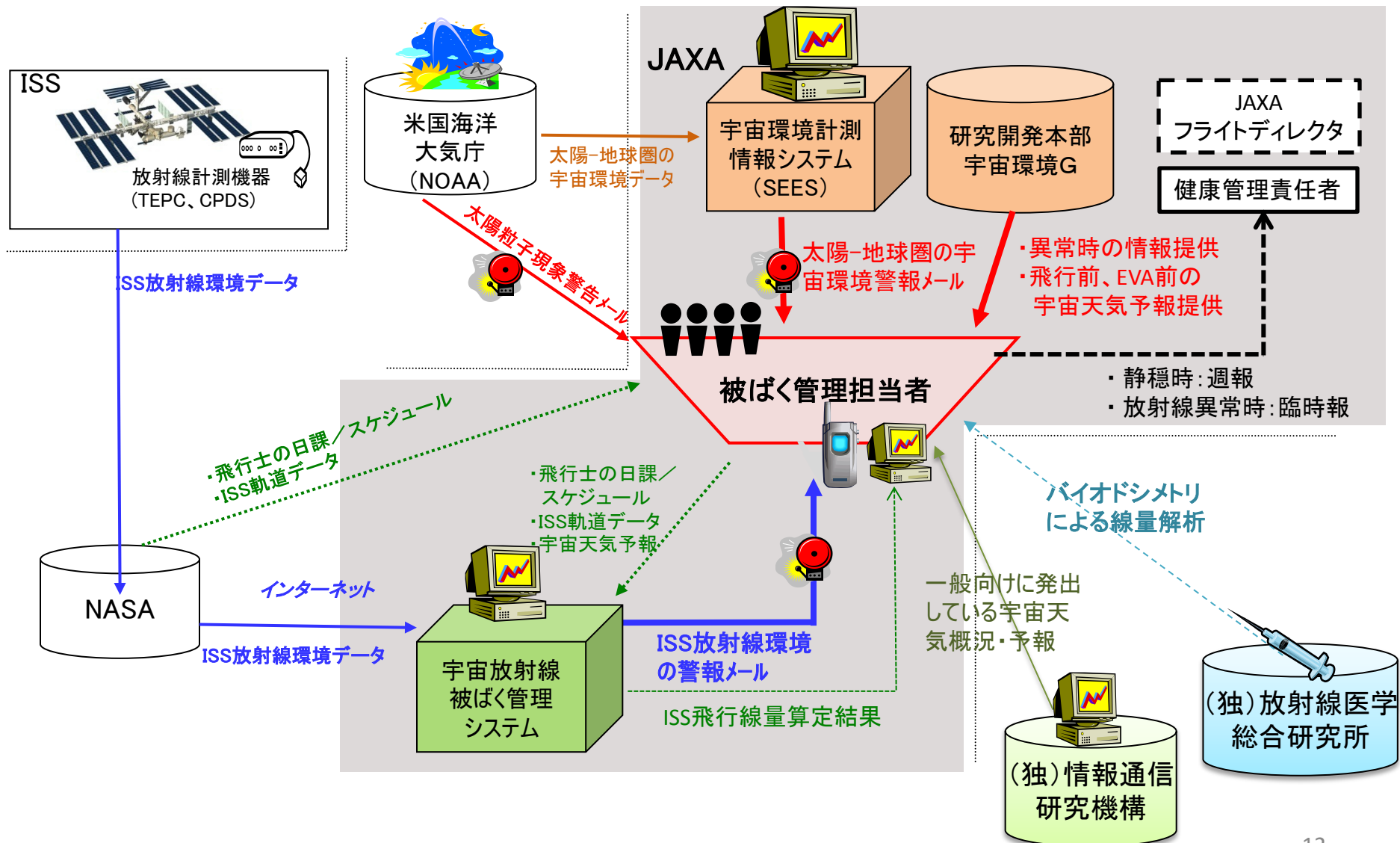
写真のサイズ: 270 × 370μm

出典: JAXA
宇宙環境利用センター
(第18回MSB資料)

宇宙放射線を ^{56}Fe + ^{12}C 粒子で模擬

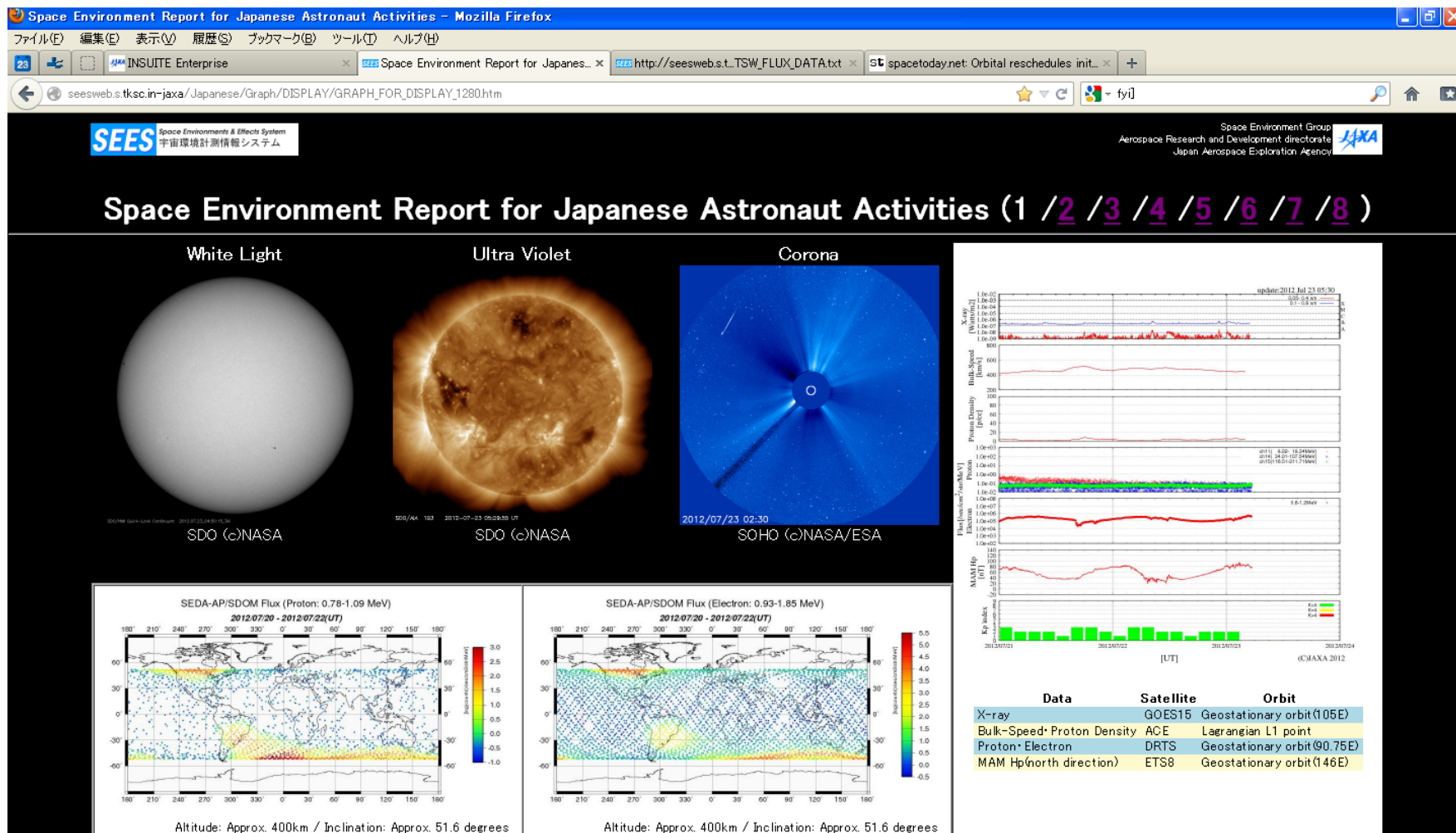
ISS滞在中の放射線被ばく管理運用

実線はオンライン、破線はオフラインを示す。



Space Environments & Effects System (SEES)

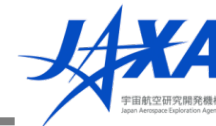
有人ミッション用に整備したweb page



Display Size: [1024*768](#) / [1280*1024](#) / [1600*1400](#) / [1680*1050](#) / [1920*1080](#) / [2560*1600](#)



宇宙環境異常時の定義



異常時のレベル	定義	対処
警戒 (Alert)	- NOAAがSPE※¹ (太陽粒子イベント (静止軌道上で10MeVを超える陽子数が10個/cm²・s・ster以上)) の予報 (警報) を出した場合 - SPEが発生した場合 地磁気嵐 (Kp ≥ 7) の場合	- ISS内の放射線量の確認 - 地上側で放射線量のモニタリングを継続 - ISS内放射線計測機器 (TEPC) の動作状況確認
非常事態 (Contingency)	ESPE※² が (高エネルギー太陽粒子イベント (静止軌道上で100MeVを超える陽子数が1個/cm²・s・ster)) が発生した場合	- ISS内の放射線量を確認し、必要に応じ介入措置を実施 (遮蔽の薄い箇所への立入制限等) 100MeV 陽子が100PFUを超過した場合は、遮蔽の厚い場所への滞在を勧告

※1 : SPE (Solar Particle Event) : 10MeVを超える陽子が10個/cm²・s・ster以上

※2 : ESPE (Energetic SPE) : 100MeVを超える陽子が1個/cm²・s・ster以上

若田ミッション時の宇宙環境異常(例)

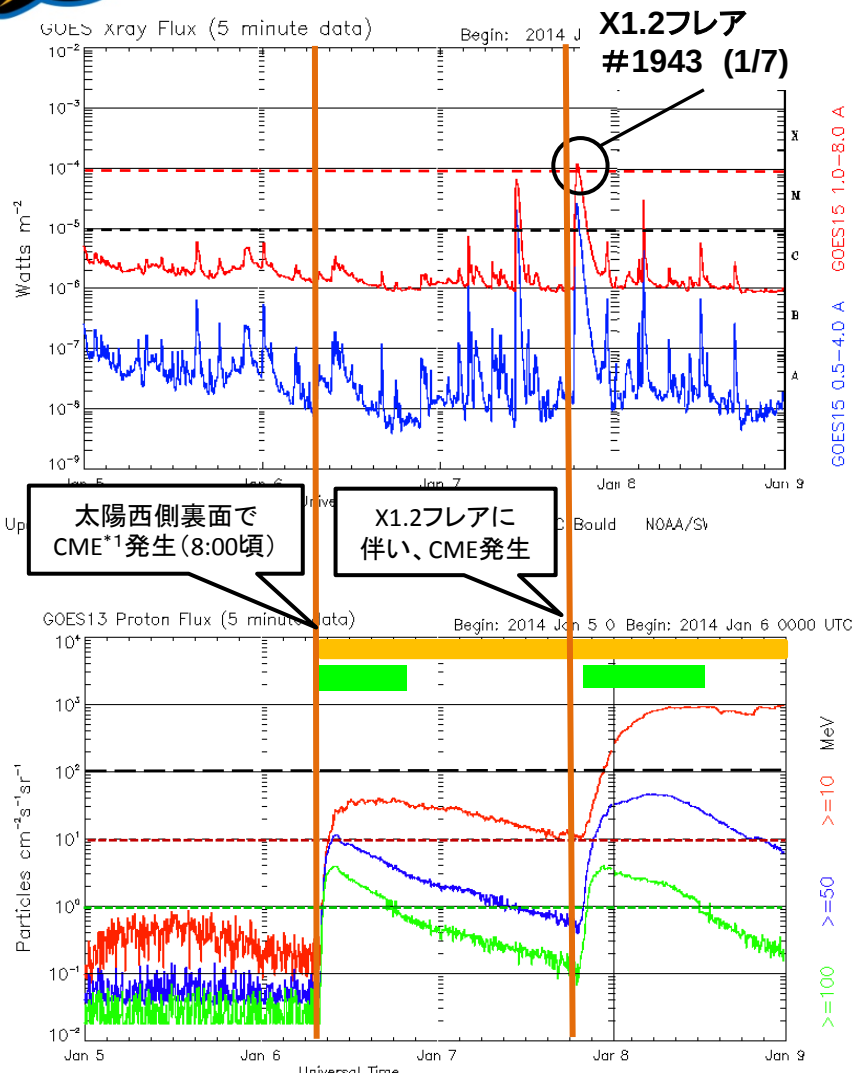
太陽フレアおよびESPEの発生状況(1/6~1/8)

(日付・時刻はGMT)



参考: GOES衛星
(Geostationary Operational Environmental Satellite)

軌道: 静止軌道
GOES13: 西経 75度
GOES15: 西経135度



静止軌道上のX線強度の推移(上)、および
高エネルギー陽子数の推移(下)(1/5-8)

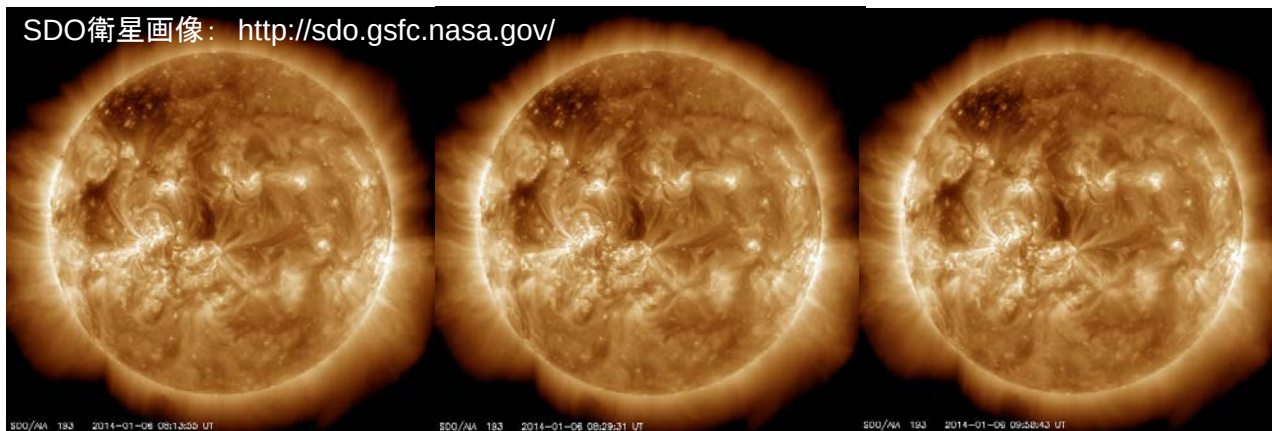
*1: CME Coronal Mass Ejection 太陽コロナ質量放出現象

若田ミッション時の宇宙環境異常(例)

1月6日に高エネルギープロトン現象(ESPE)発生

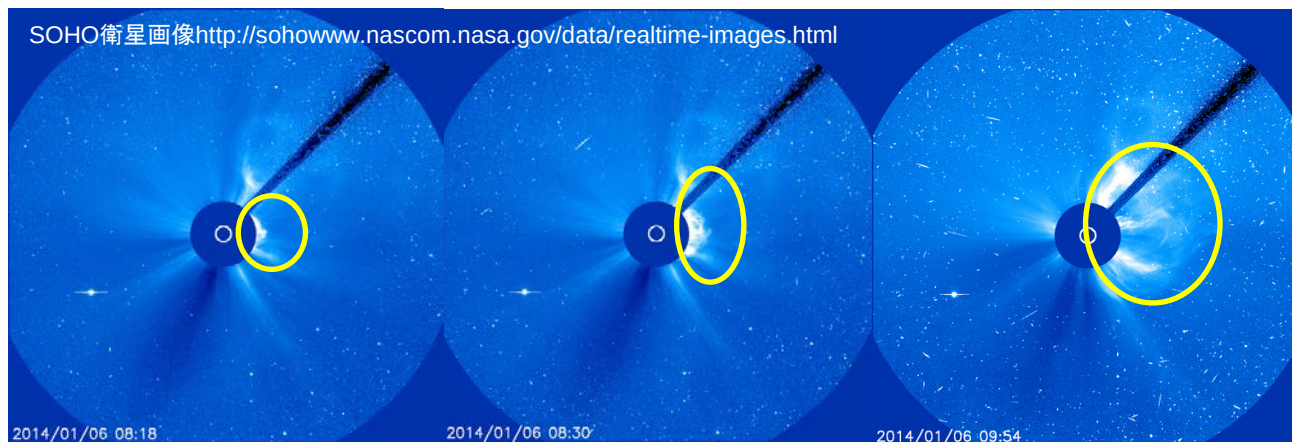
(日付・時刻はGMT)

SDO衛星画像: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>



1月6日のCME発生(下図参照)と、ほぼ同時刻の太陽表面の活動状況:
地球側からは、特筆すべき太陽X線フレアは観測されていない。(左から08:13, 08:29 09:58)

SOHO衛星画像<http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>

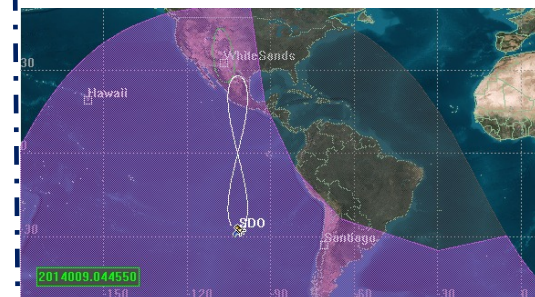


1月6日に太陽西側「裏面」で発生した太陽コロナ質量放出現象(CME)
中心の○が太陽を示す。(左から 08:18, 08:30 09:54)

参考: SDO衛星

(Solar Dynamic Observatory)

軌道: 対地同期軌道(軌道傾斜
角28.5度 高度36,000km)

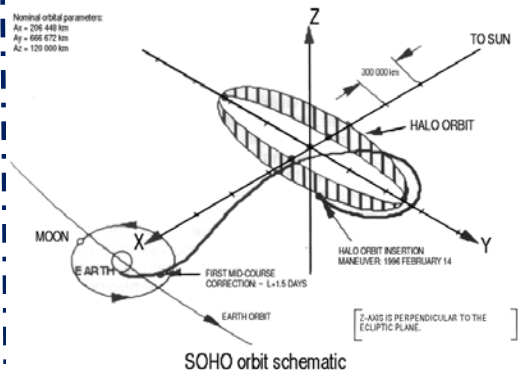


SDO衛星軌道の対地投影図

参考: SOHO衛星

(Solar and Heliospheric Observatory)

軌道: L1 ハロー軌道
(太陽-地球ラグランジュ点:L1)





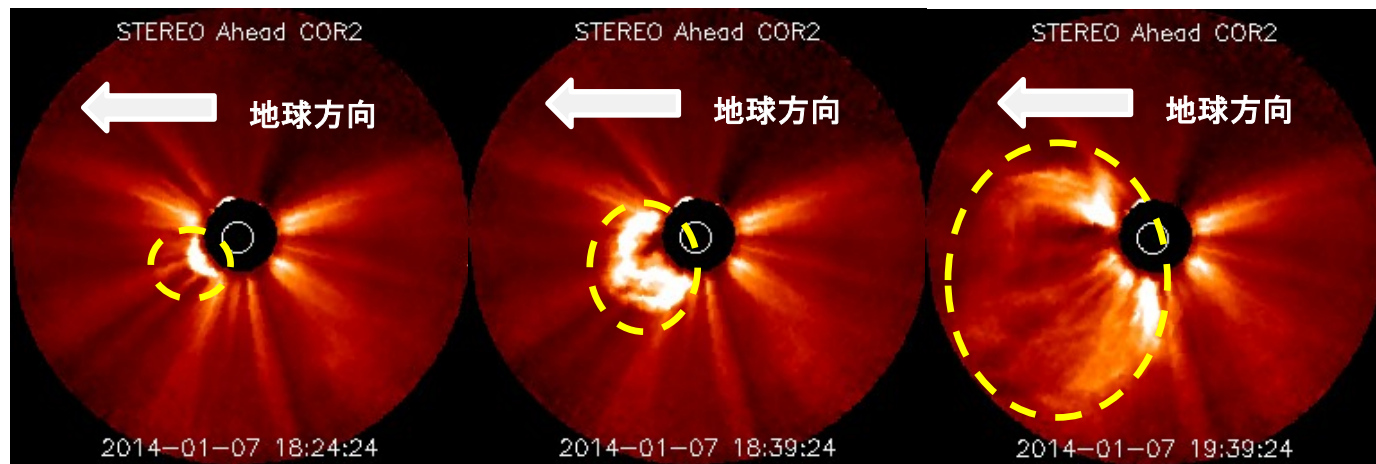
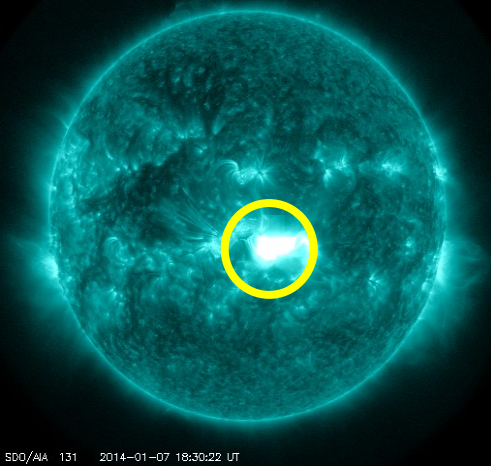
若田ミッション時の宇宙環境異常(例)



1月7日に高エネルギープロトン現象(ESPE)発生

(日付・時刻はGMT)

SDO衛星画像: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/>

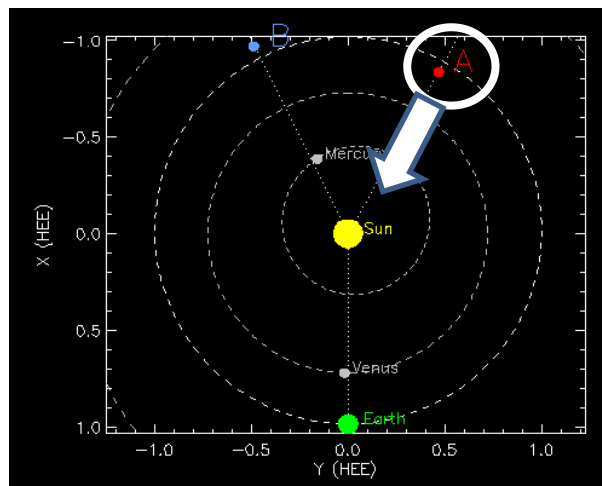
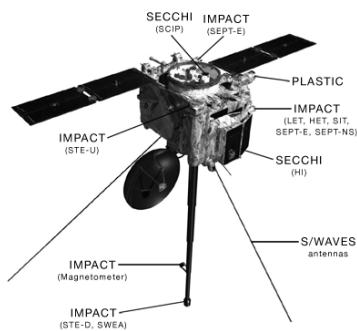


STEREO衛星画像 <http://stereo.gsfc.nasa.gov/>

1月7日に発生した大規模フレア(X1.2)
X線強度が、ほぼ最大に達した時刻
(18:30)の極端紫外線画像。

1月7日のX1.2大規模フレアに伴い、地球方向に発生した、太陽コロナ質量放出現象(CME)。
STEREO衛星で観測。中心の○が太陽を示す。(左から18:24, 18:39, 19:39)

参考: STEREO衛星
軌道: 太陽周回軌道



上記「STEREO Ahead」は、左図赤で
示すAのポイントから太陽方向を観察し
た画像。

(全てSTEREO WEBページより)

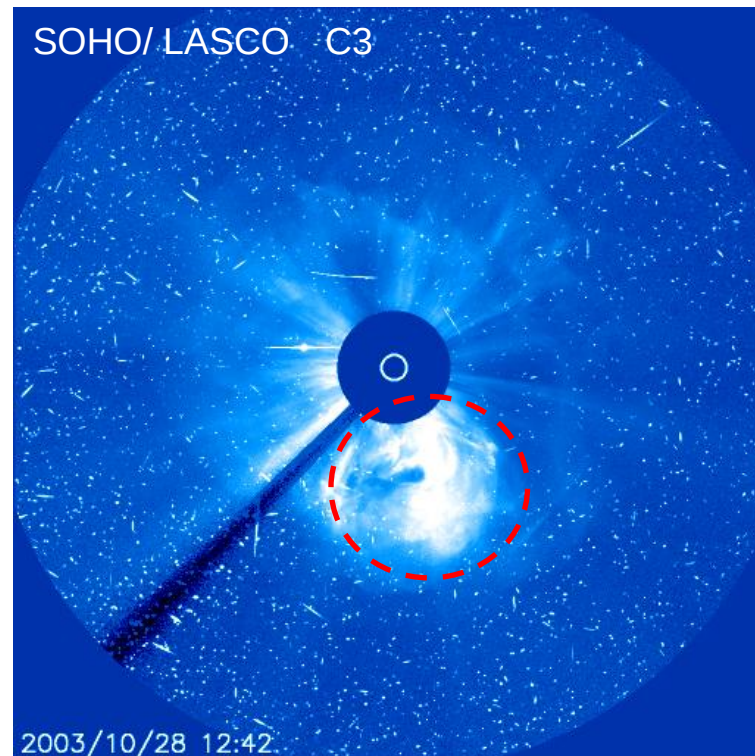
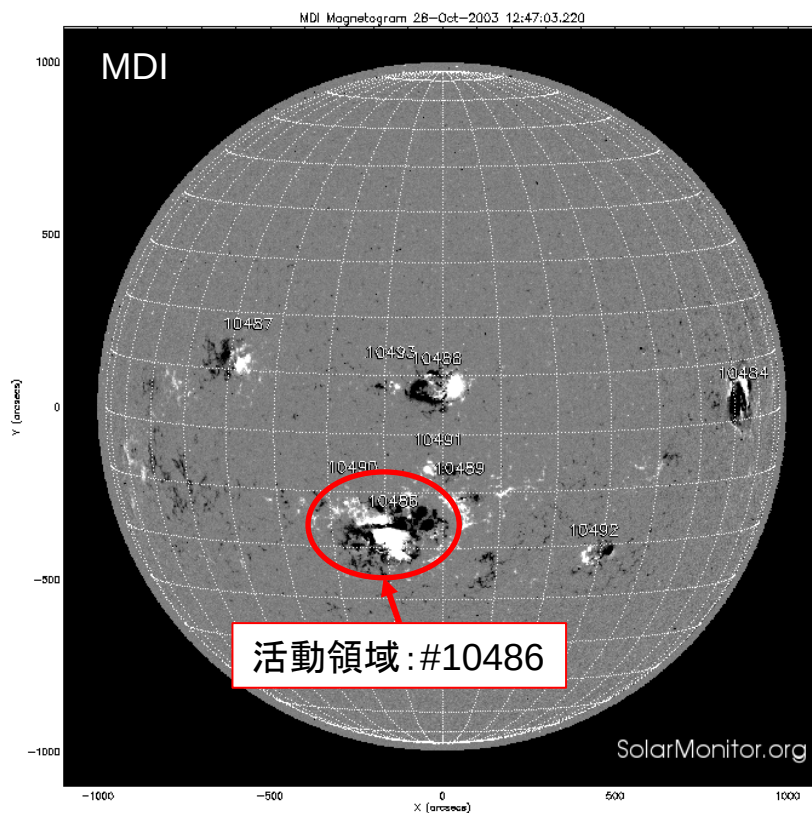
巨大太陽フレア発生例

2003年10月28日:

1975年以降3番目の規模である巨大フレア(X17)発生

このフレアにより、静止軌道で観測された**高エネルギー粒子(10MeV)数は29,500pfu**

⇒ 宇宙飛行士の活動を制限し遮蔽効果の高い場所に退避

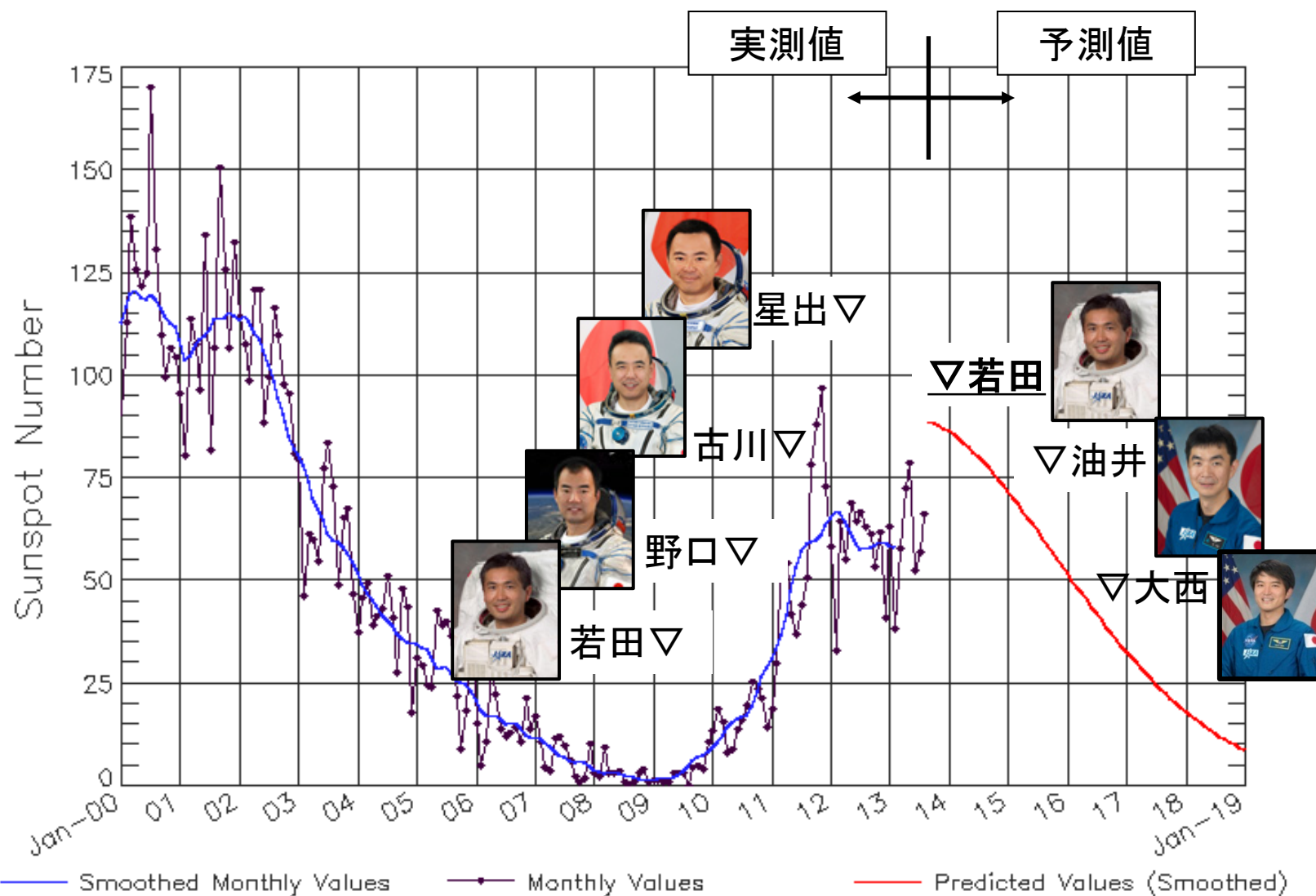


左: 衛星MDI、右: SOHO衛星コロナグラフ(中央の目隠しの○部分が太陽)

赤丸で囲った部分は、太陽から放出される粒子(Coronal Mass Ejection(CME); コロナ質量放出)の様子。

出典: Solar Monitor(左)、SOHO (ESA & NASA)(右)

今後の太陽活動について





- (1) ISS軌道では、陽子(プロトン)、電子、重粒子が多い環境
 - (2) 宇宙飛行士の放射線被ばく管理は、生涯の被ばく線量制限値を、JAXA独自に設定し管理を実施
 - (3) ISS滞在中の宇宙飛行士の放射線被ばく管理の運用では、太陽フレアによる高エネルギー陽子(プロトン)等を常に監視し、被ばく線量のモニタと異常時の対応を実施
- ⇒ 太陽フレアの発生時期やフレアによる影響の度合い(陽子や電子の変化)に関する精度の高い予測手法の開発が望まれる！