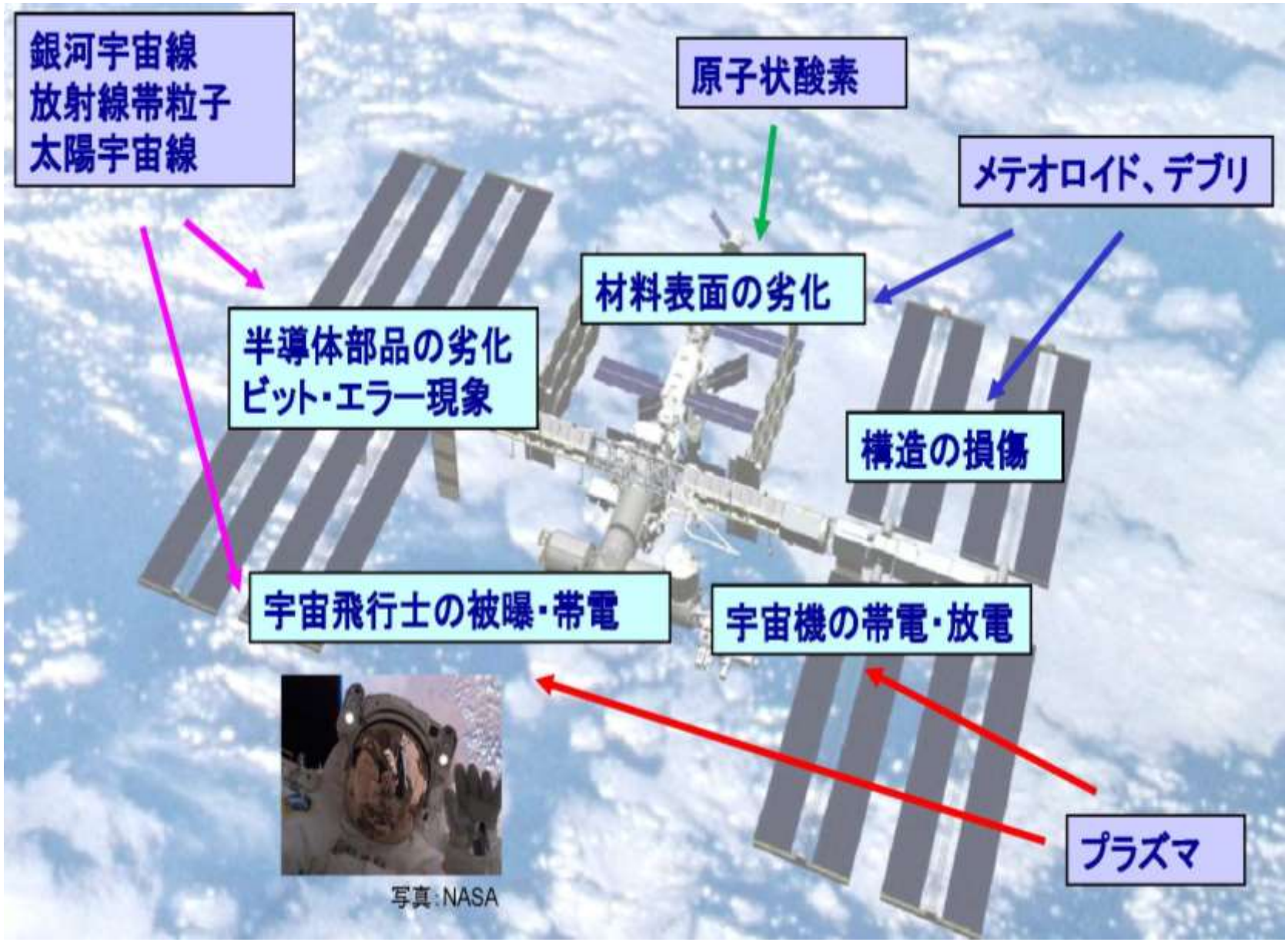
PSTEP SEP CDAW
2018.8.7
Kyoto University

衛星障害

小原　隆博
（東北大学大学院理学研究科）

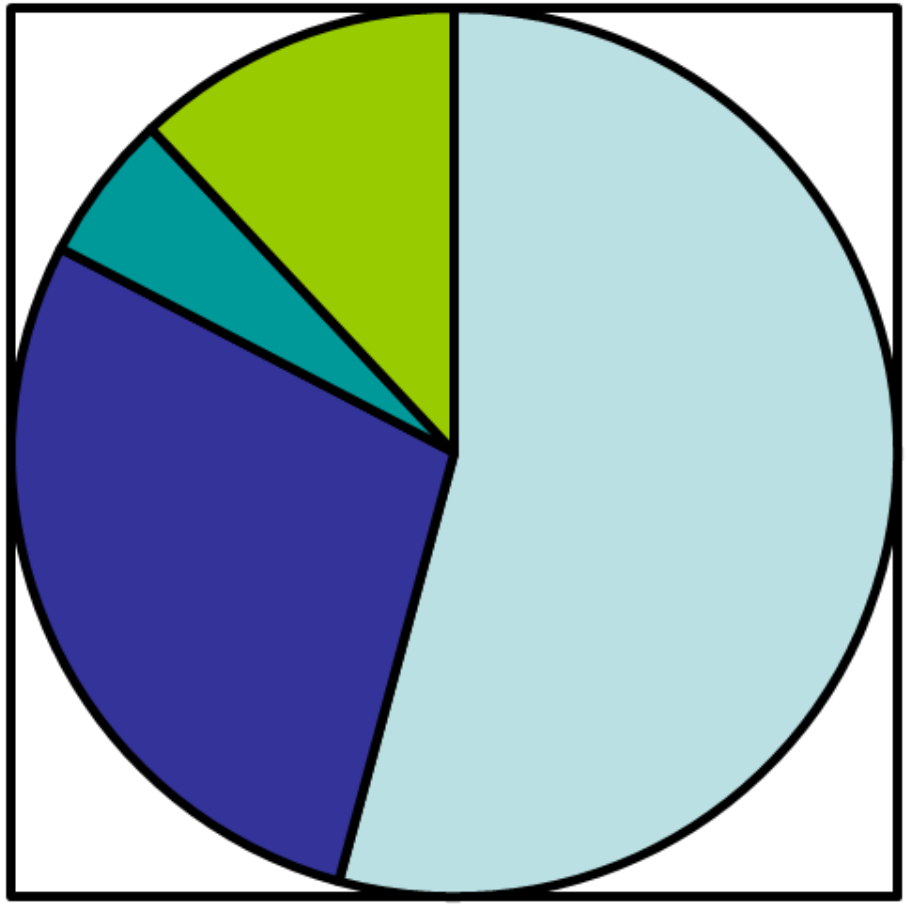
obara@pparc.gp.tohoku.ac.jp


銀河宇宙線
放射線帯粒子
太陽宇宙線
原子状酸素
メテオロイド、デブリ
材料表面の劣化
半導体部品の劣化
ビット・エラー現象
構造の損傷
宇宙飛行士の被曝・帯電
宇宙機の帯電・放電
プラズマ
写真:NASA

宇宙環境のじょう乱と障害

障害の発生箇所	内　容	主な原因
衛星本体	表面異常帯電 深部帯電 半導体エラー 材料劣化 軌道変化	磁気圏高温プラズマ 放射線帯粒子 太陽フレア粒子･放射線帯粒子 太陽フレア粒子･放射線帯粒子 熱圏大気膨張
衛星電波	測位誤差 シンチレーション	電離圏全電子数変化 電離圏不規則構造
有人宇宙活動	放射線被曝	太陽フレア粒子

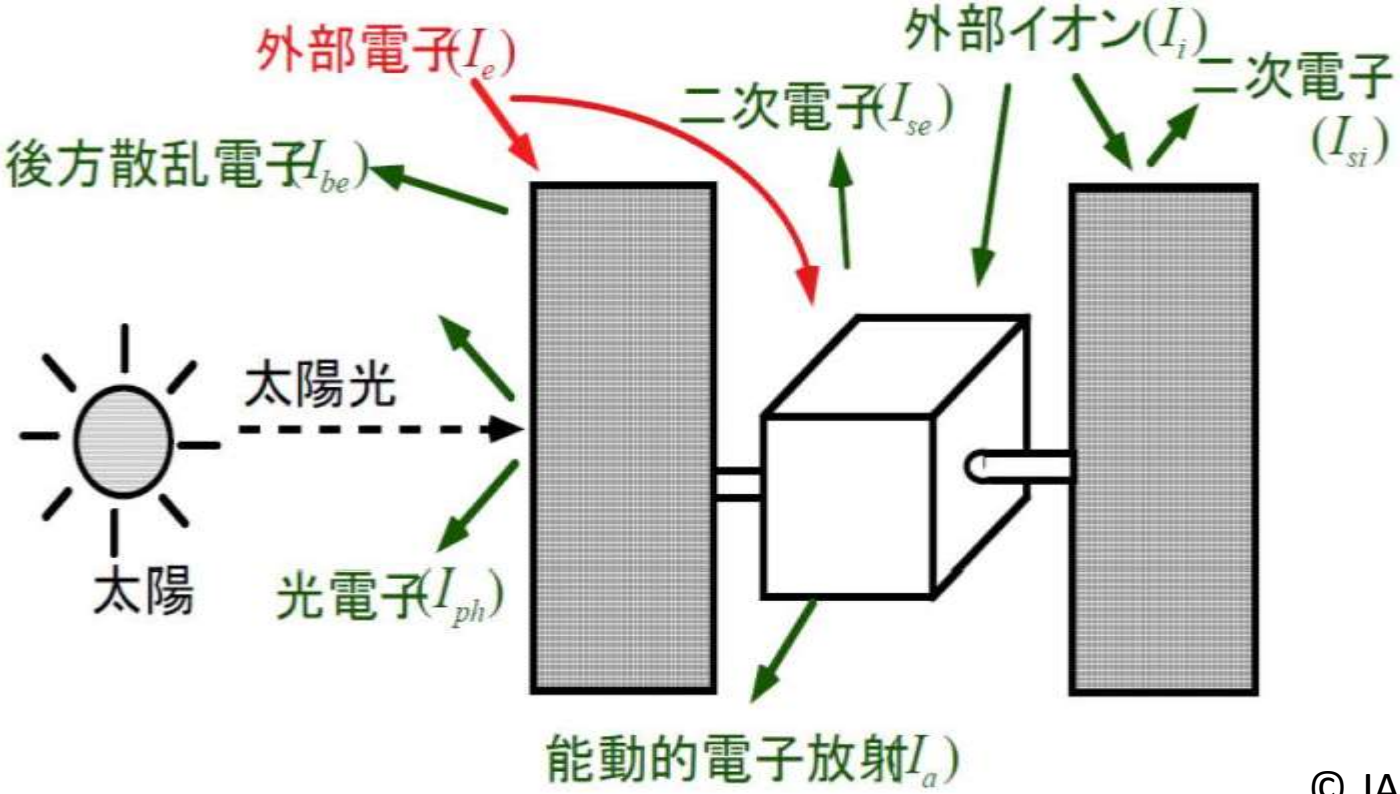
Satellite Anomalies



Koons, et al., (1957-1997)

A. 衛星帯電（表面・深部）

1.表面帯電

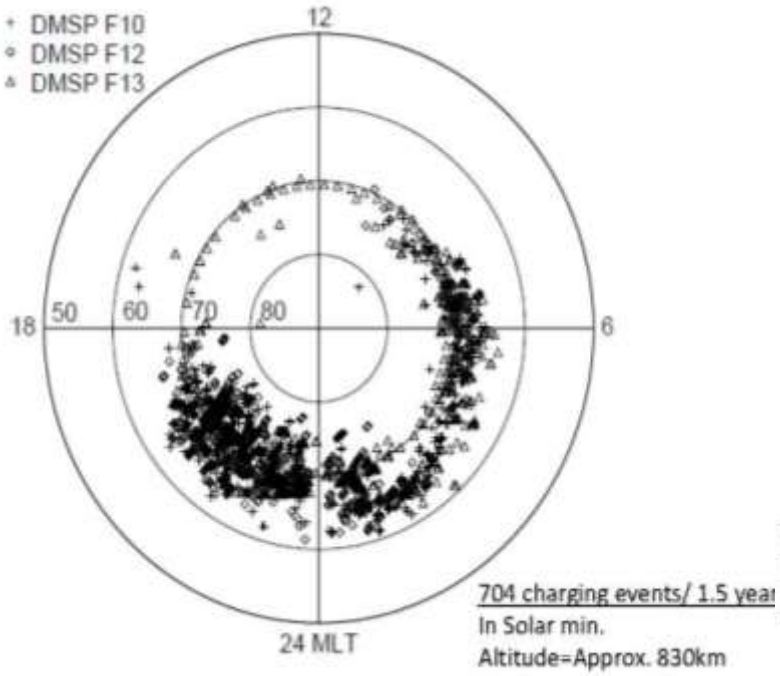


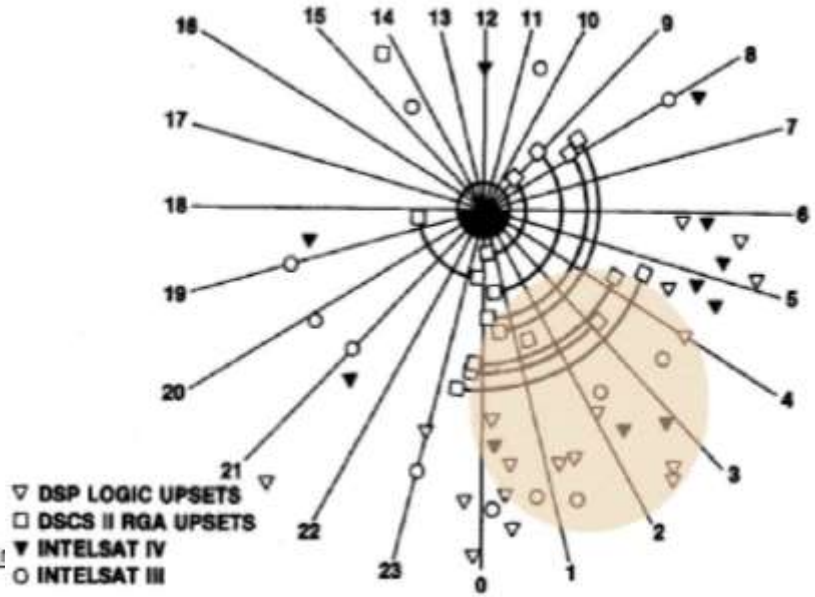
© JAXA, Koga

衛星構体の宇宙空間に対する電位は、外部とやりとりする正電流と負電流が均衡するように決められる。

衛星表面帯電を起こしやすい場所

低高度衛星：高緯度夜側　　静止軌道衛星：夜側～朝側





© Anderson, 2000

© Rosen, 1976

軌道別帯電放電現象

■ 極軌道（北極）

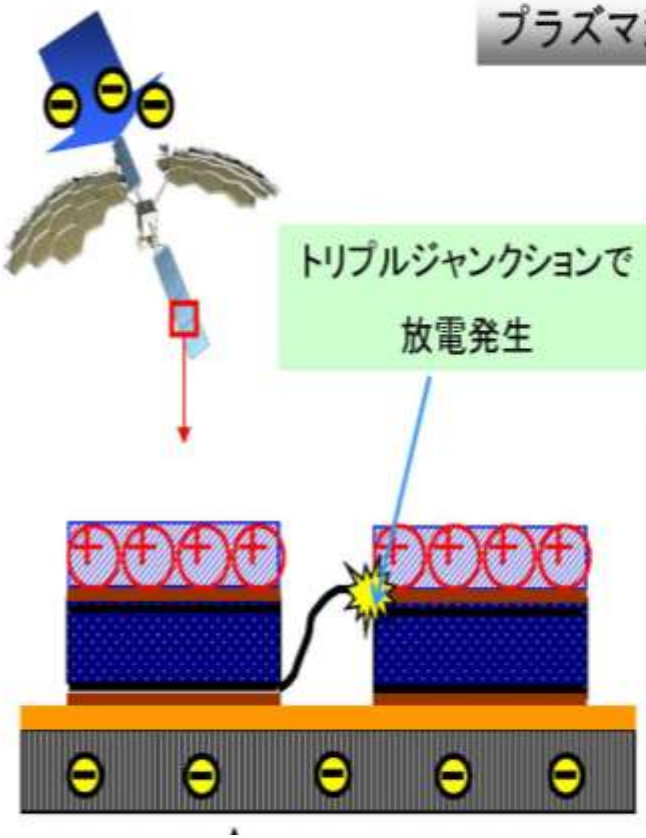
オーロラ電子（高エネルギー電子）との遭遇

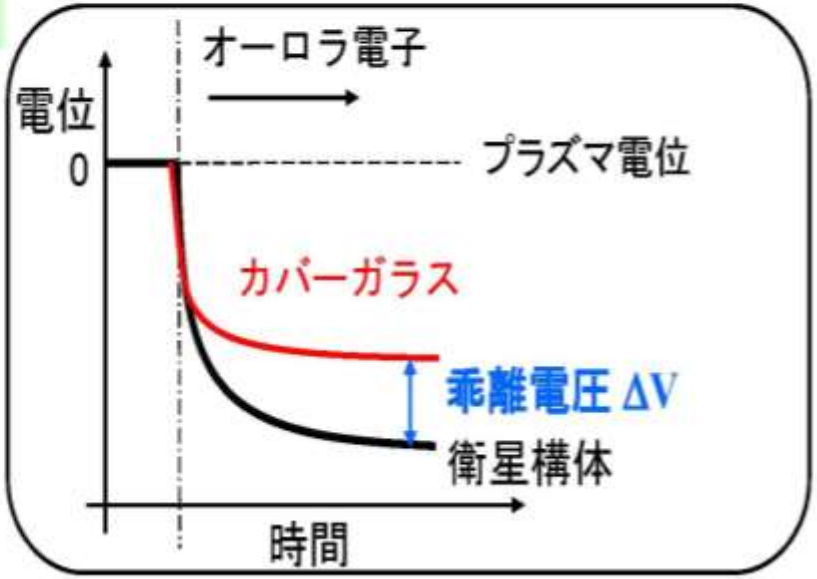
衛星構体が負に帯電（絶対帯電）

プラズマ流入出による絶縁体の帯電（局所帯電）

電位差発生

放電発生





© JAXA

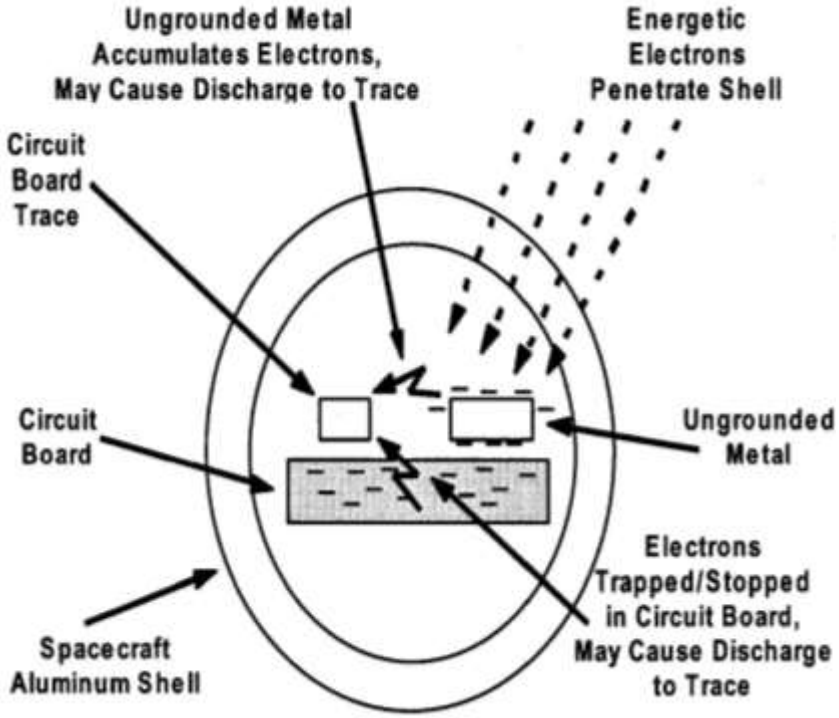
表面帯電の対策

・表面の物体間を銅線で結線
・太陽電池のカバーガラスを導電性被膜付
（ITO：酸化イリジウム）にする
・熱制御材表面にITOを被覆する

・熱制御材は, 高誘電率のテフロンを避けて
高伝導度のブラックテフロンを使用する

2.内部帯電

・アースがない金属,
　電子回路の基板間
　同軸ケーブルの線間
　等の容量や誘電体
　に帯電
・衛星内部には,
　0.1MeVで貫通する
・耐圧を超えると放電
・静止衛星の内部帯電
　0.1MeV～3MeV



内部帯電の対策

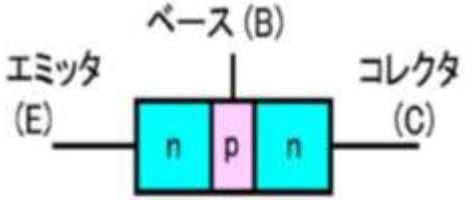
- アルミ3mm厚に相当するシールドで囲む
- テフロンやカプトンなどの誘電体材料の使用量を少なくする
- 回路基盤などに,電流のリークパス（$10^{12}\Omega/m^2$）を必ずつける
- スポット的な放射線シールドの金属材には必ずリークパスをつける

B. 半導体損傷

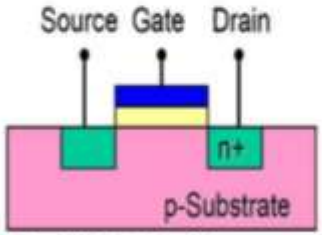
電子部品の小型化と半導体

真空管

トランジスタ



バイポーラトランジスタ

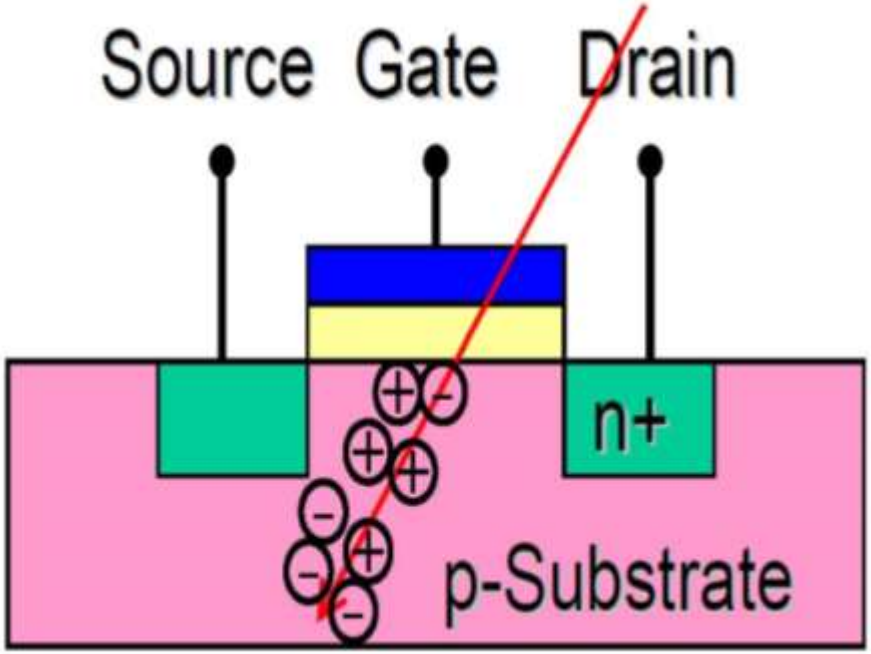


電界効果型トランジスタ
(MOSFET)

© JAXA, Maru

電離損傷

放射線によって半導体中の電子が励起されて,伝導電子や正孔が生じ, デバイスの特性が変化する



© JAXA, Maru

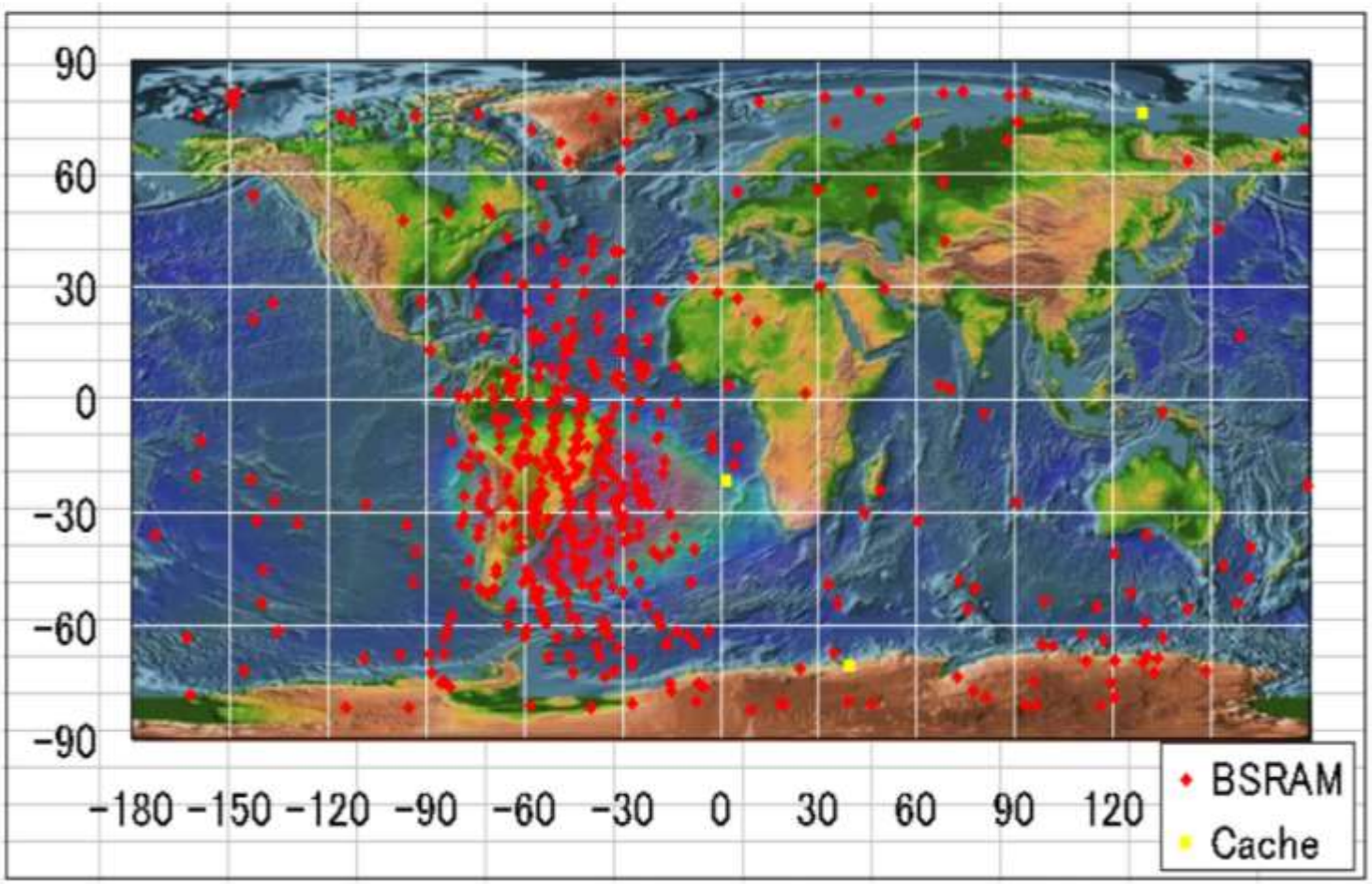
a) シングルイベント現象:

単発粒子が半導体素子に入射することにより
生じる誤動作,損傷の総称

- シングルイベントアップセット
  SRAM,DRAM等のメモリ素子に記憶されて情報が反転
- シングルイベントラッチアップ
  CMOS素子全般に見られるか電流生成現象
- シングルイベントバーンアウト
  放射線の影響で回路中に大電流が流れるパスが出来,その部分が焼損

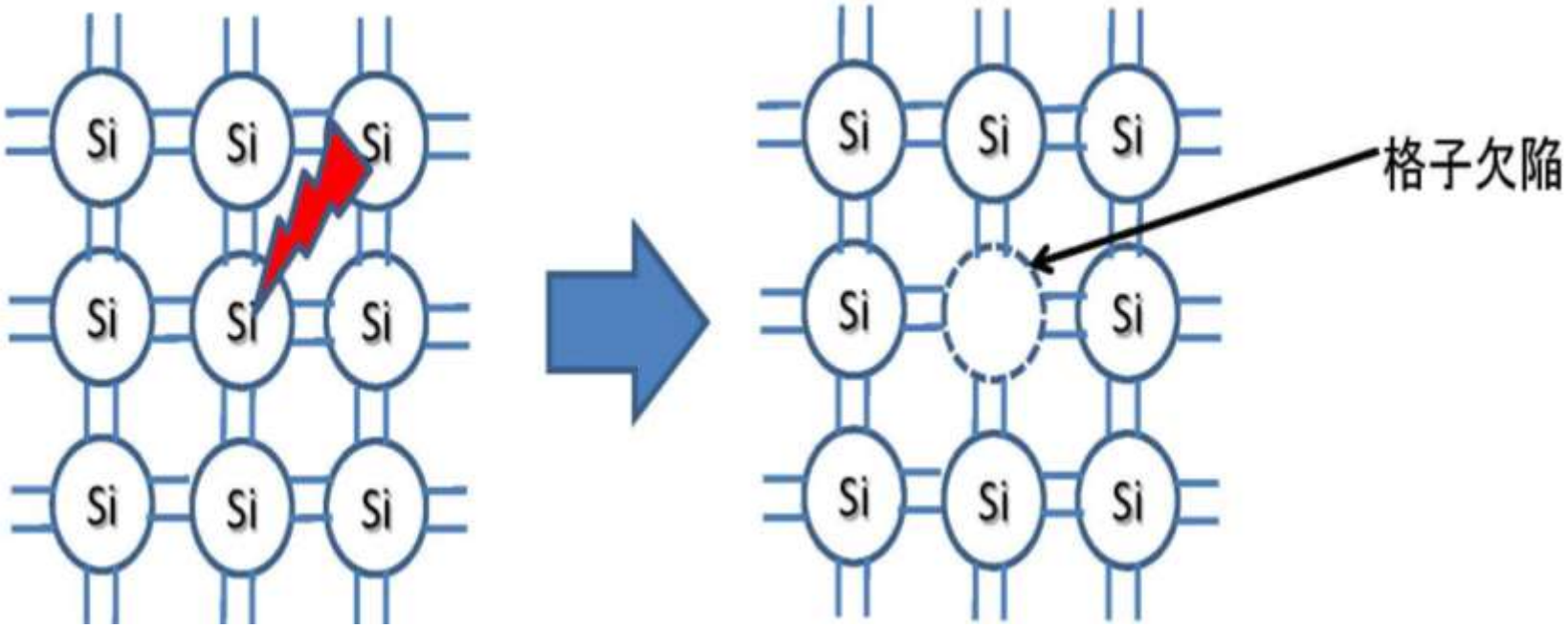
SEE事例(JAXA SDS-1 sat)

軌道高度:666km, 軌道傾斜角:98.06°
総運用時間:2464.4時間、発生総SEU数:539回



変位損傷

放射線によって半導体中の結晶格子ははじき出され,
格子欠陥が生じる. それが半導体の特性を劣化させる



© JAXA, Maru

放射線対策

a) 放射線シールド

非常に高エネルギーの放射線には, 効果が完全ではない

b) Radiation Hardened By Design (RHBD)

論理回路レベルで対策

i. Cross-coupled resister

ii. Triple Module Redundancy

iii. Dual Interlocked storage Cell (DICE)

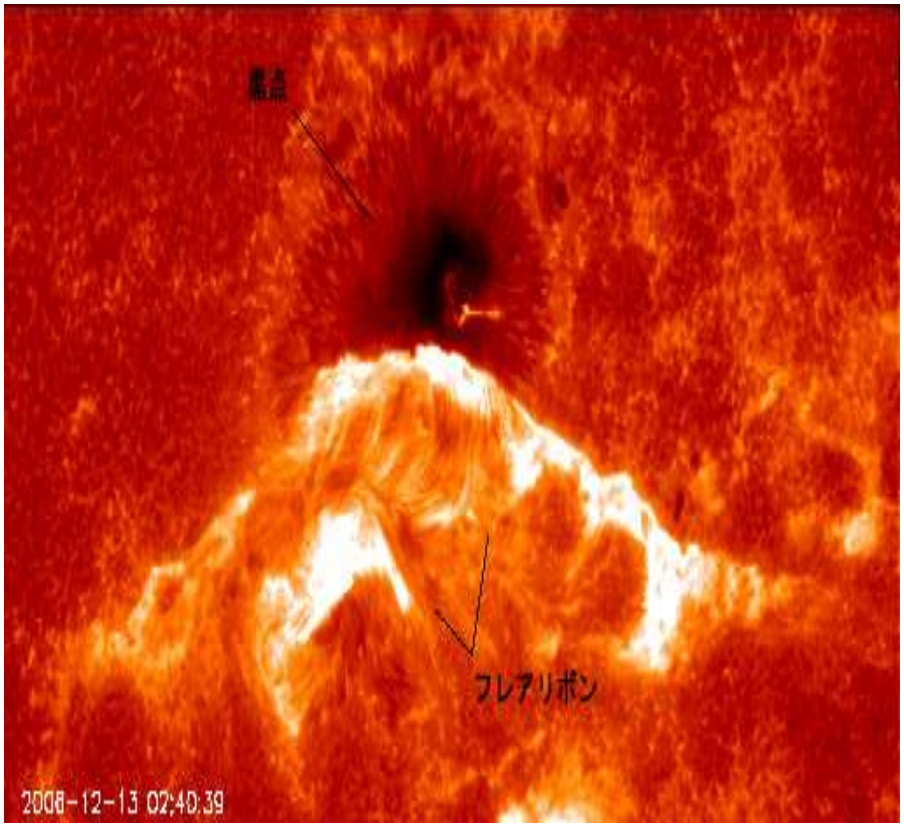
c) 新技術・材料の導入 (eg. Silicon On Insulator: SOI)

Example :

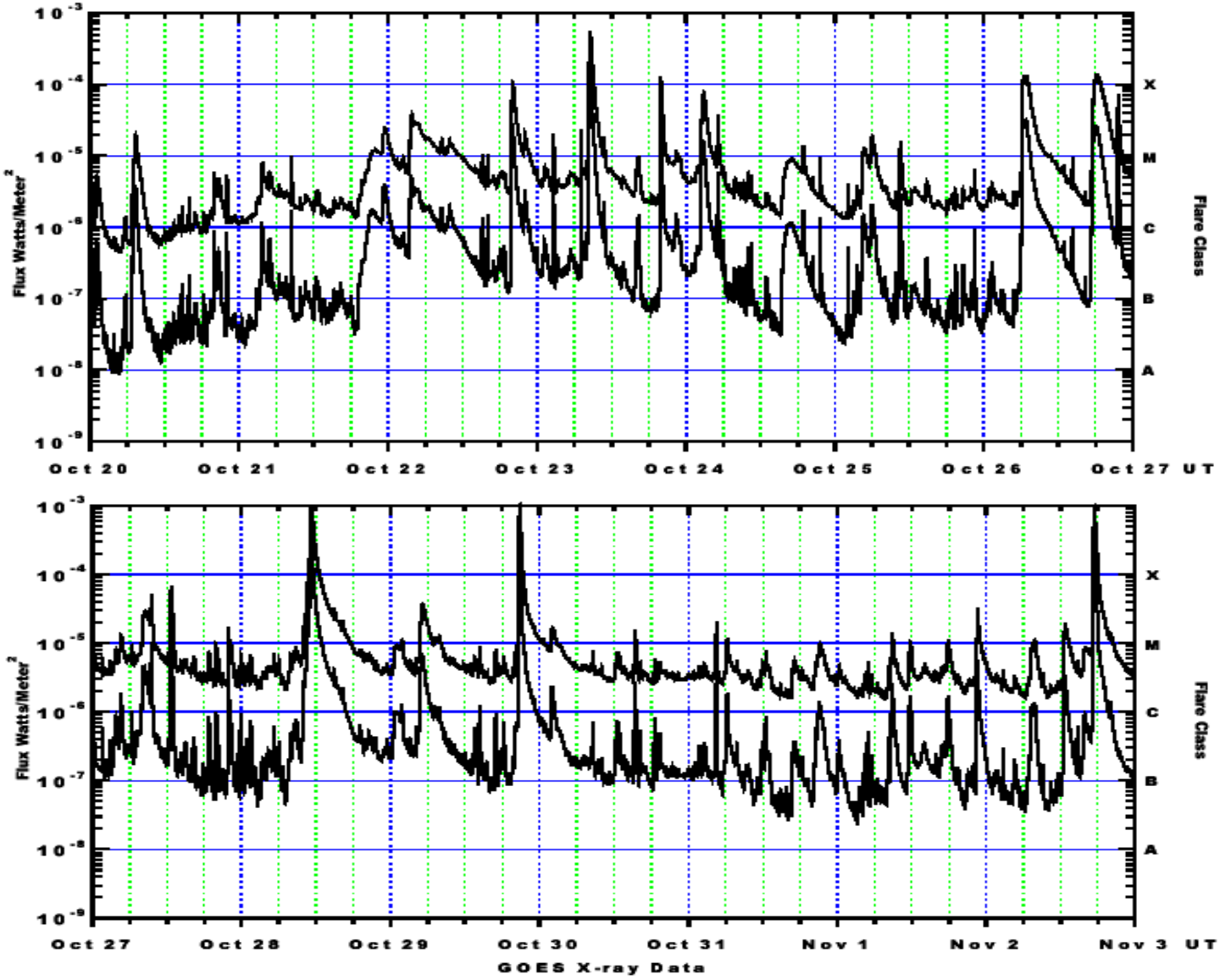
Satellite Anomaly occurred during 2003 Halloween Event

2003年10月期の太陽フレア時の衛星運用異常

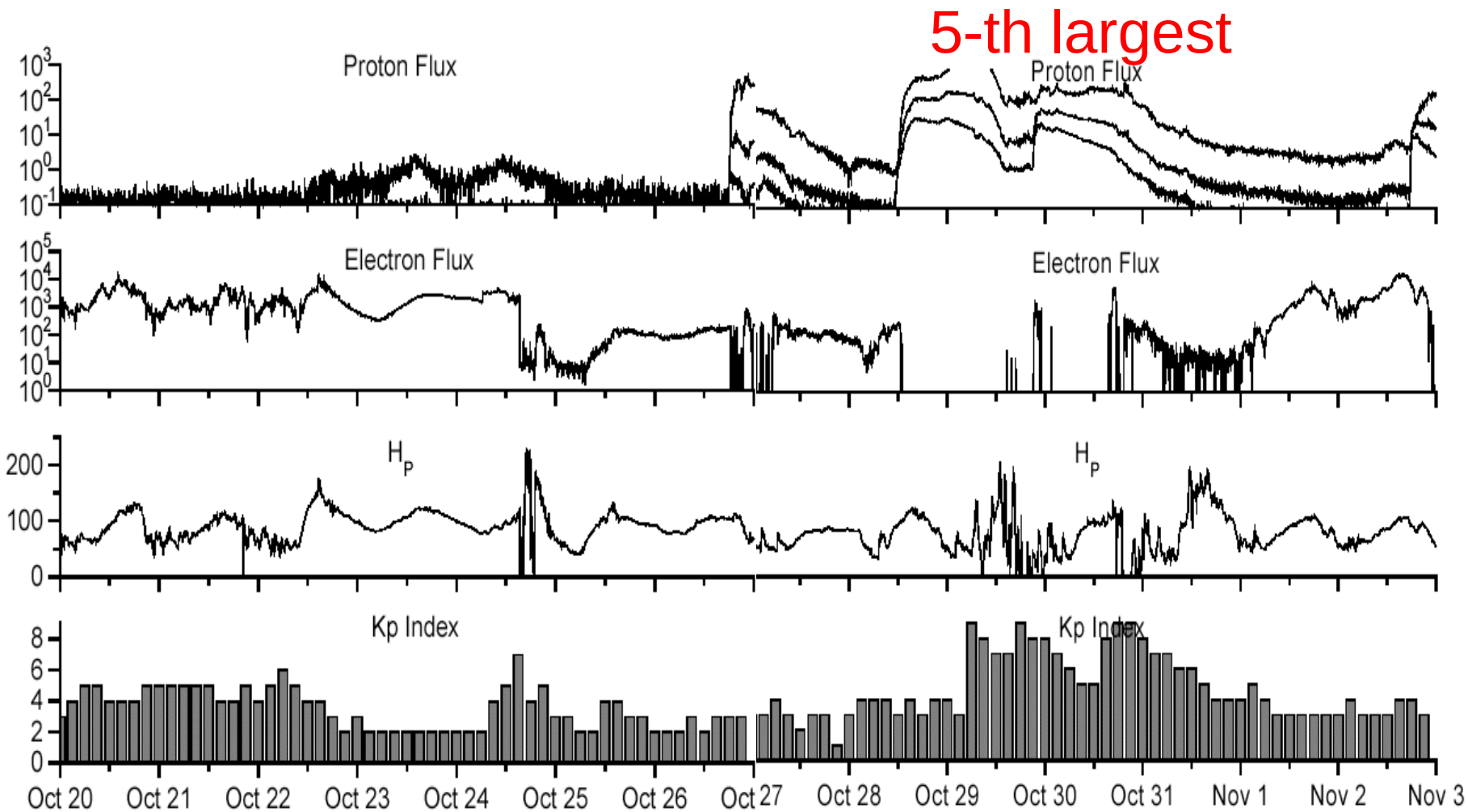
ADEOS-II (みどり-2)
電力喪失の運用異常
（10月24日）
- 事故時の宇宙環境
- ADEOS-II の電力
- 喪失の故障シナリオ
（複合環境）



Solar flares during 2003.Oct.20 – Nov.3

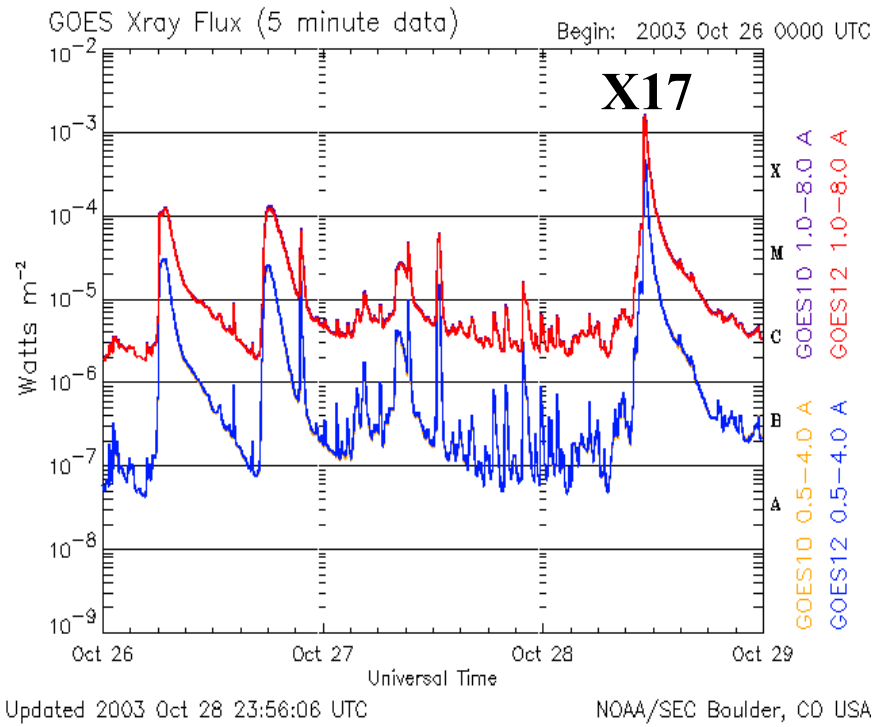


Solar proton, MeV electron, Magnetic field at GEO and Kp index during 2003.Oct.20 – Nov.3

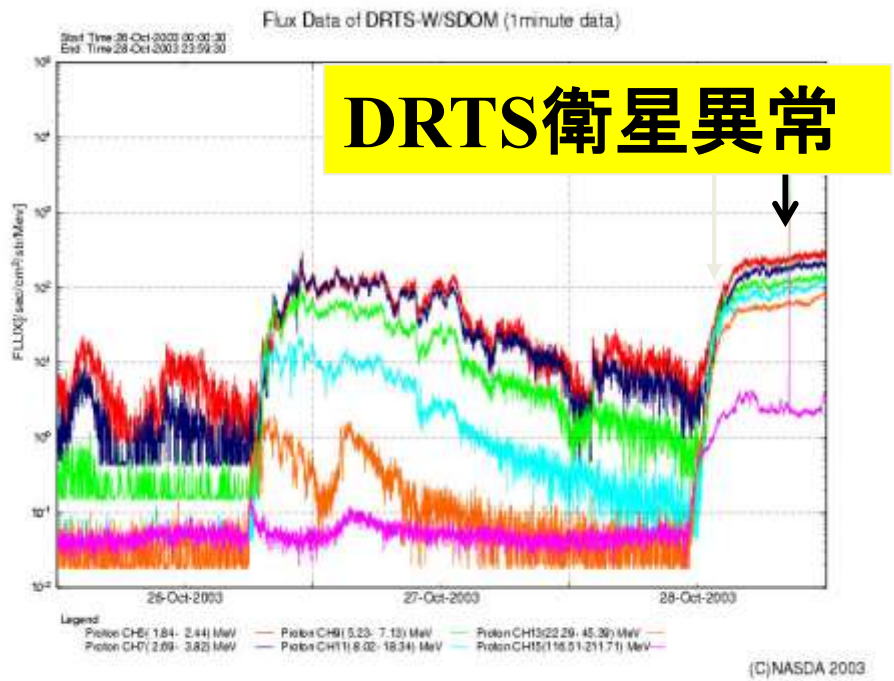


DRTS不具合原因

10月28日のX-17太陽フレアによりセーフティ・モードに移行



GOES X線データ



DRTS　陽子データ

More than 60 % of NASA Scientific Satellites were affected by this big solar storm (NASA GSFC). For 25 % satellites NASA actually send commands to turn off the instruments or so.

JAXA DRTS: to safe hold mode 10. 28 18:42UT

NOAA 17 micro wave observation instrument : broken 10. 27

GOES-8 X ray sensor : broken 10. 27

GENESIS: to safe hold mode 10. 23

STARDUST: read error 10. 24

CHANDRA: observation stop 10. 24

GOES－12: trucker error 10. 24

SMART－1: ion engine stop 10. 26

INTEGRAL： to safe hold mode 10. 26

ICESAT： GPS reset 10. 28

DMSP－16： data loss 10. 28

SOHO： to safe hold mode 10. 28

SIRFTF: observation stop 10. 28

FEDSAT： data loss 10. 30

ACE, WIND： data loss 10. 28

GOES： electron sensor data loss 10. 28

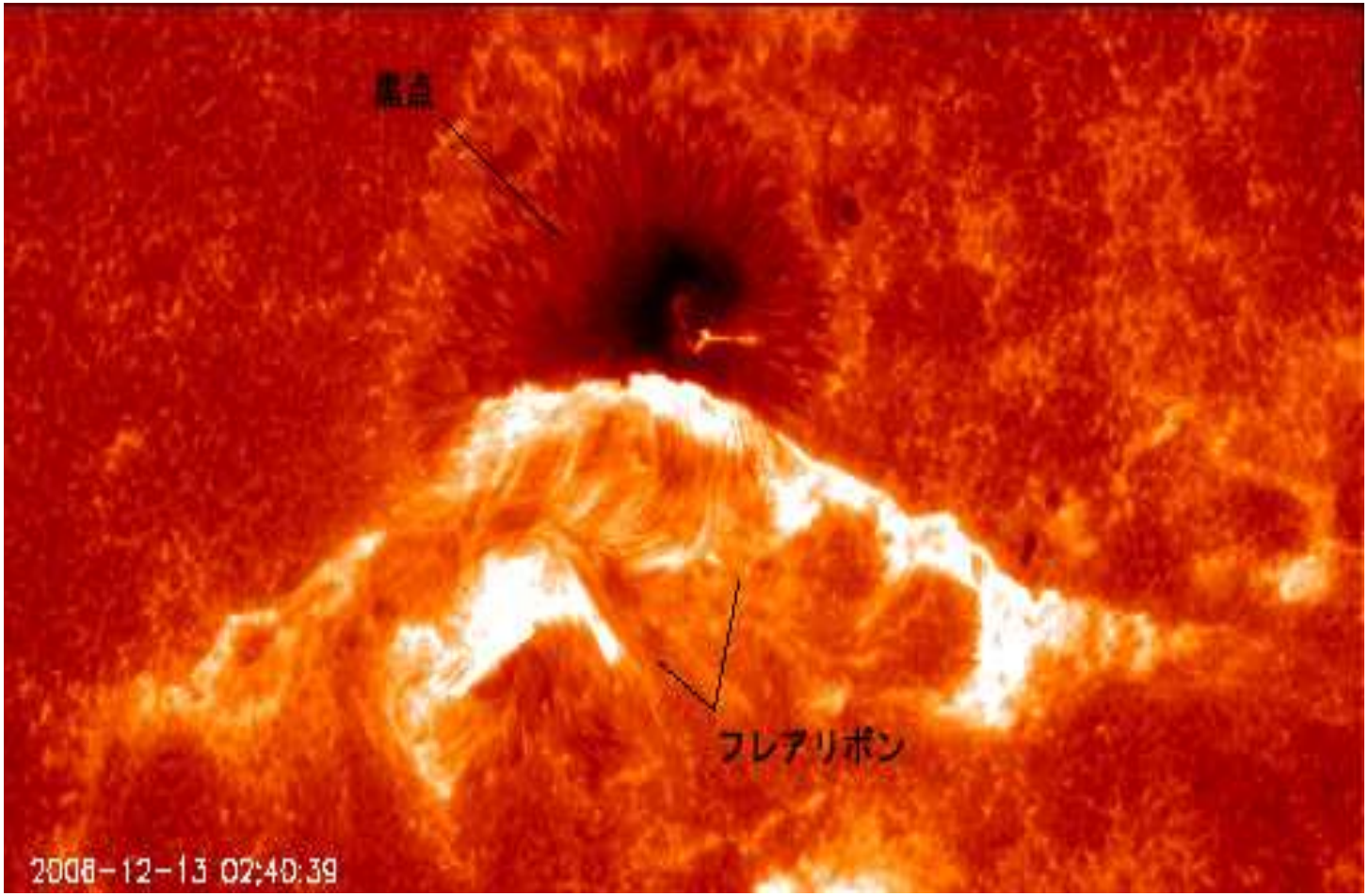
GALEX： UV instrument turn off 10. 28

POLAR： despan lock off 10. 28-30

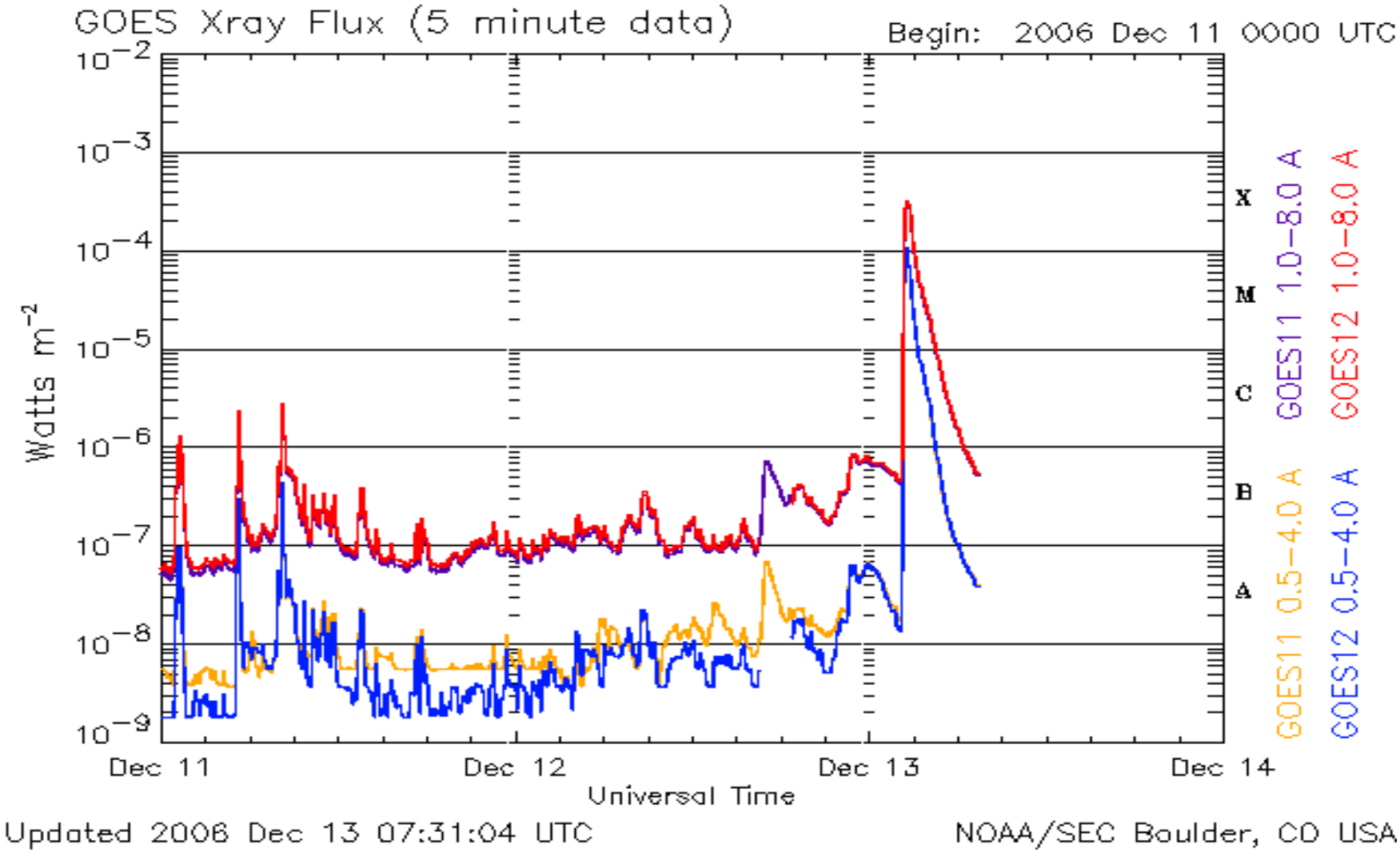
ISS： Altitude decrease 150m/day 10. 30

Example:

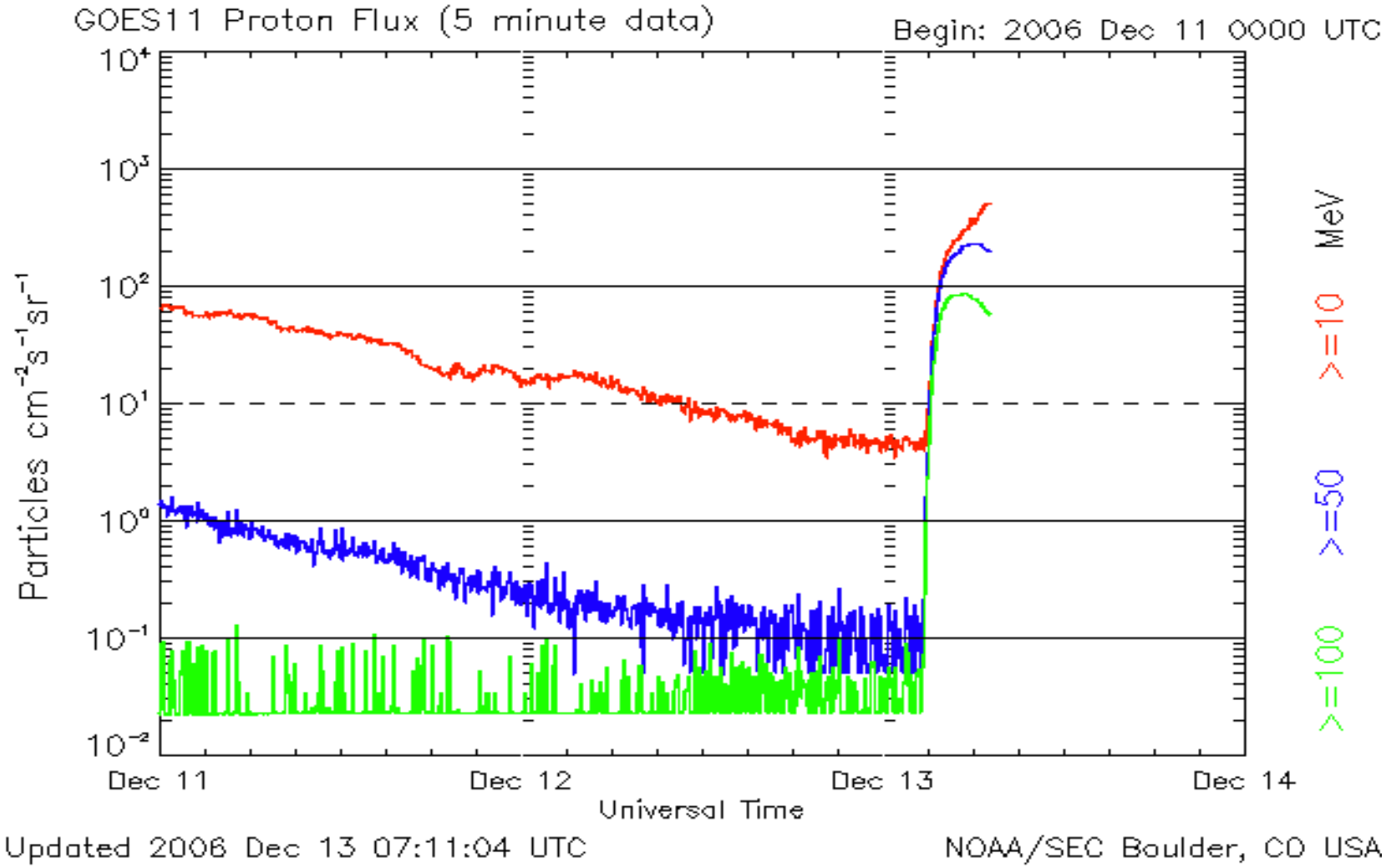
Satellite Anomaly occurred during 2006.Dec.13 solar flare event



Big Flare detected by JAXA HINODE satellite



Large increase of solar X-rays – GOES observation -



Large increase of solar particles – GOES observation -

ESA press release

on Dec. 15, 2006

- The Sun's Active Week -

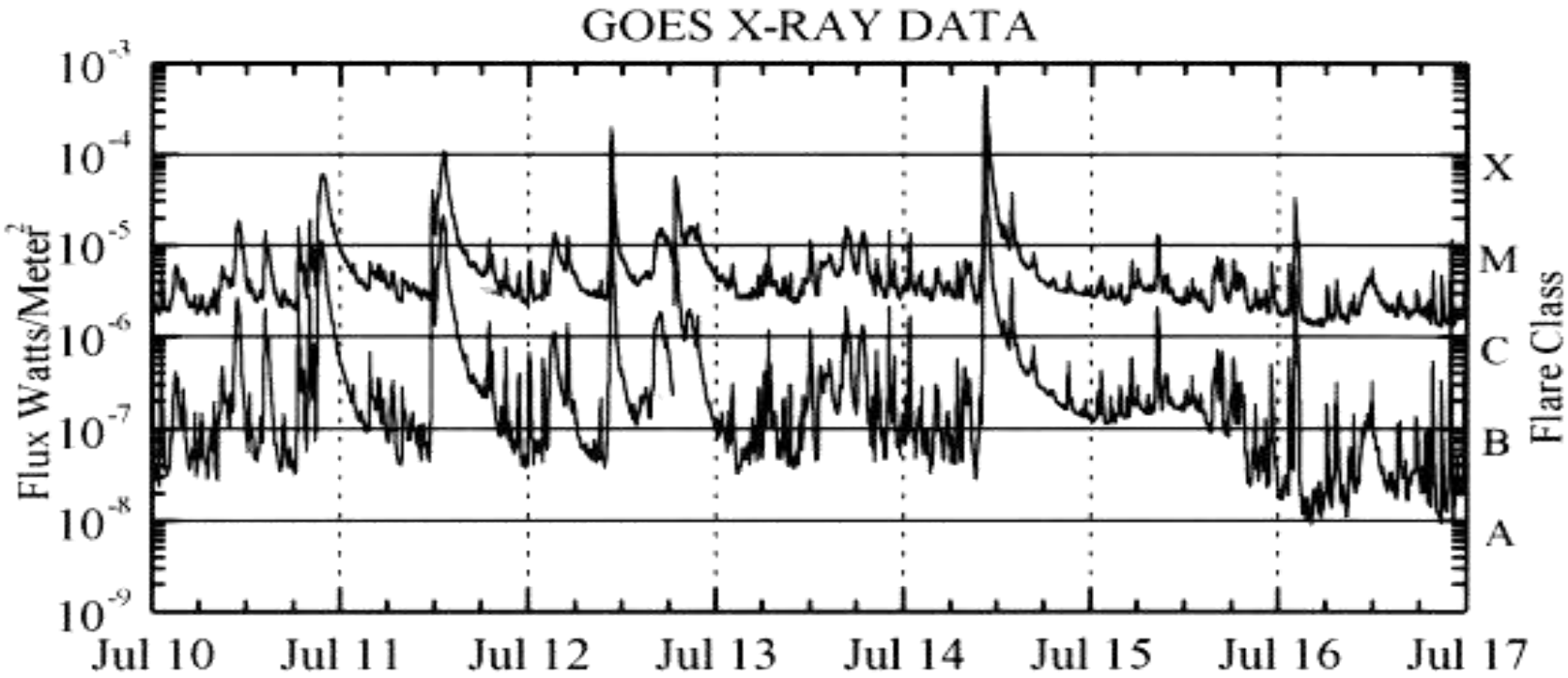
Several missions, including Integral, Cluster, and Envisat, felt storm's effect

Cluster 1 -> minor anomaly
Cluster 2 -> AOC (Attitude & Orbit Control system) power off
Cluster 4 -> High Power Amp. Power off
Envisat -> Payload Module Computer, suspended
All instruments, switched off
Integral -> JEM-E, switched off, IRIS manually switch off

Example :

Satellite Anomaly occurred during 2000 Bastille Event

Solar flares during 2000.July 10 – July 16



Lots of satellite experienced anomalies.....

GOES－5： Loss of power (6W)

ASUKA： safe hold, degradation of solar power cell

AKEBONO： lots of set up events

YOHKOH： lots of noises in CCD

ACE： Sun sensor failure

SOHO，TRACE： lots of noises

GOES－8，10： Operation stop (1 day)

WIND： Sun sensor stop (1 week)

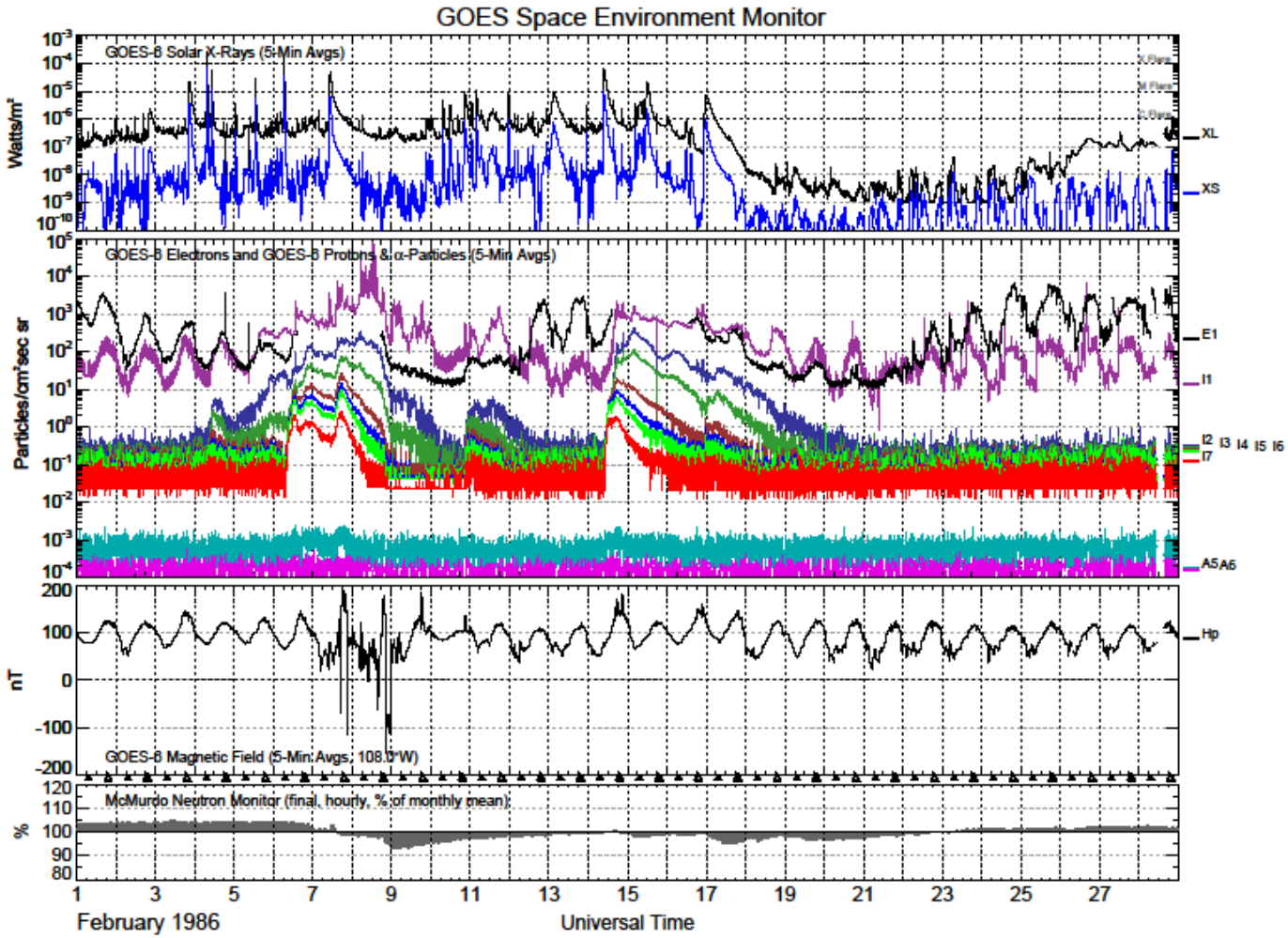
Other Anomalies

1986. 02. 08－09

1989. 09. 29－30

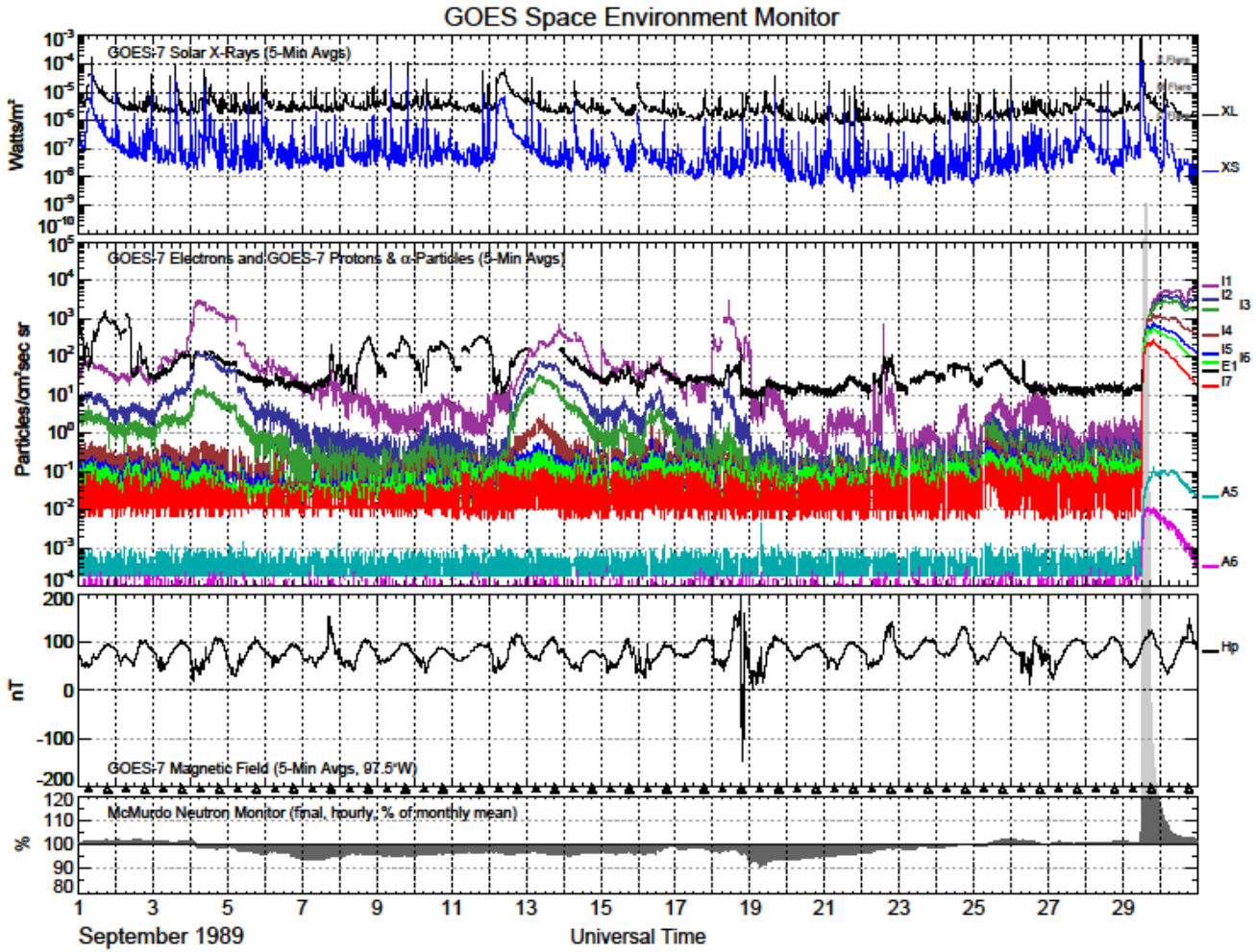
1989. 10. 19

1991. 03. 22－24



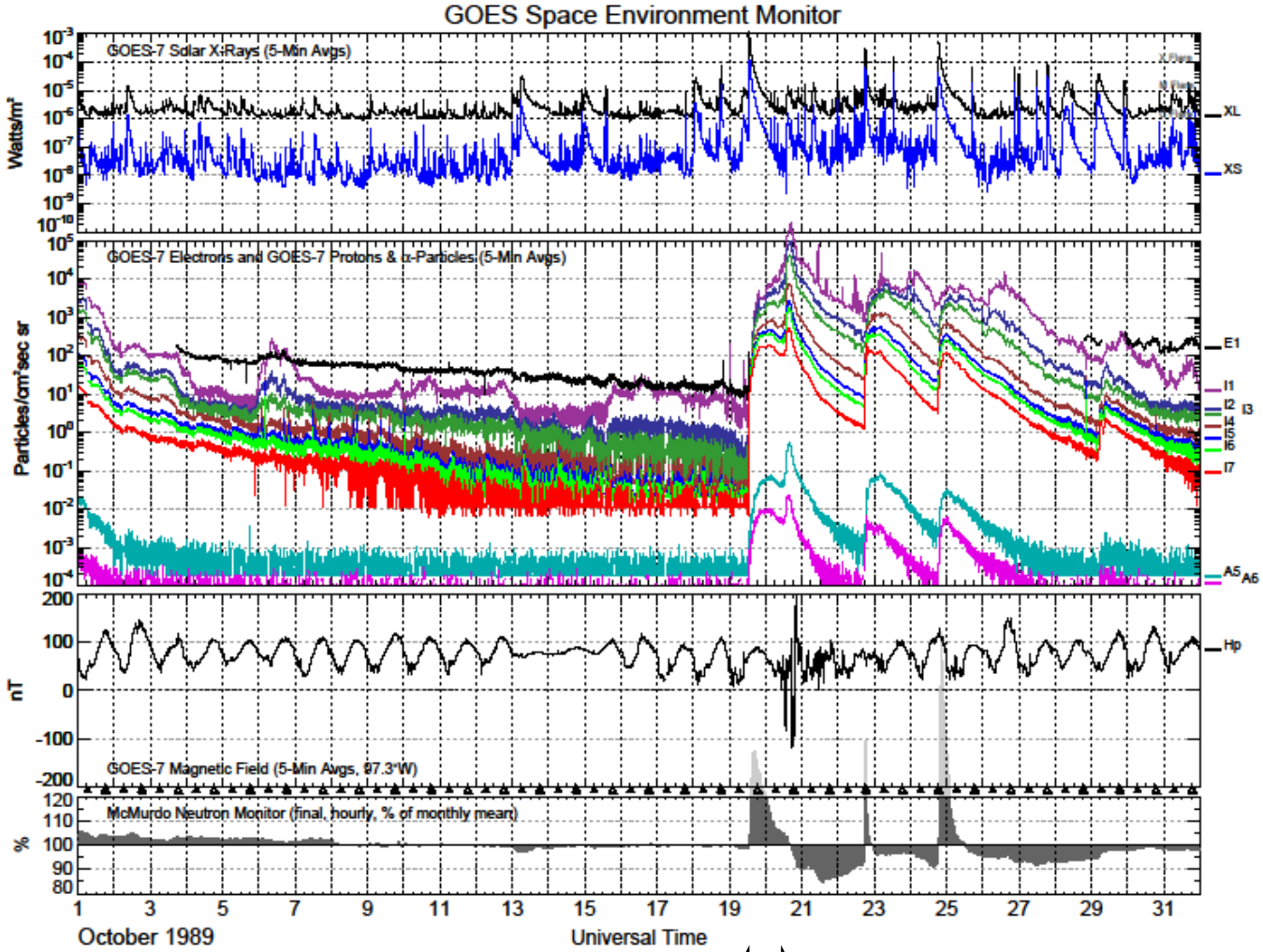
1986.02.08 AMPTE/CCE
Anik B
1986.02.09 00:18 GMS-3

Solar Energetic Particle (Protons)



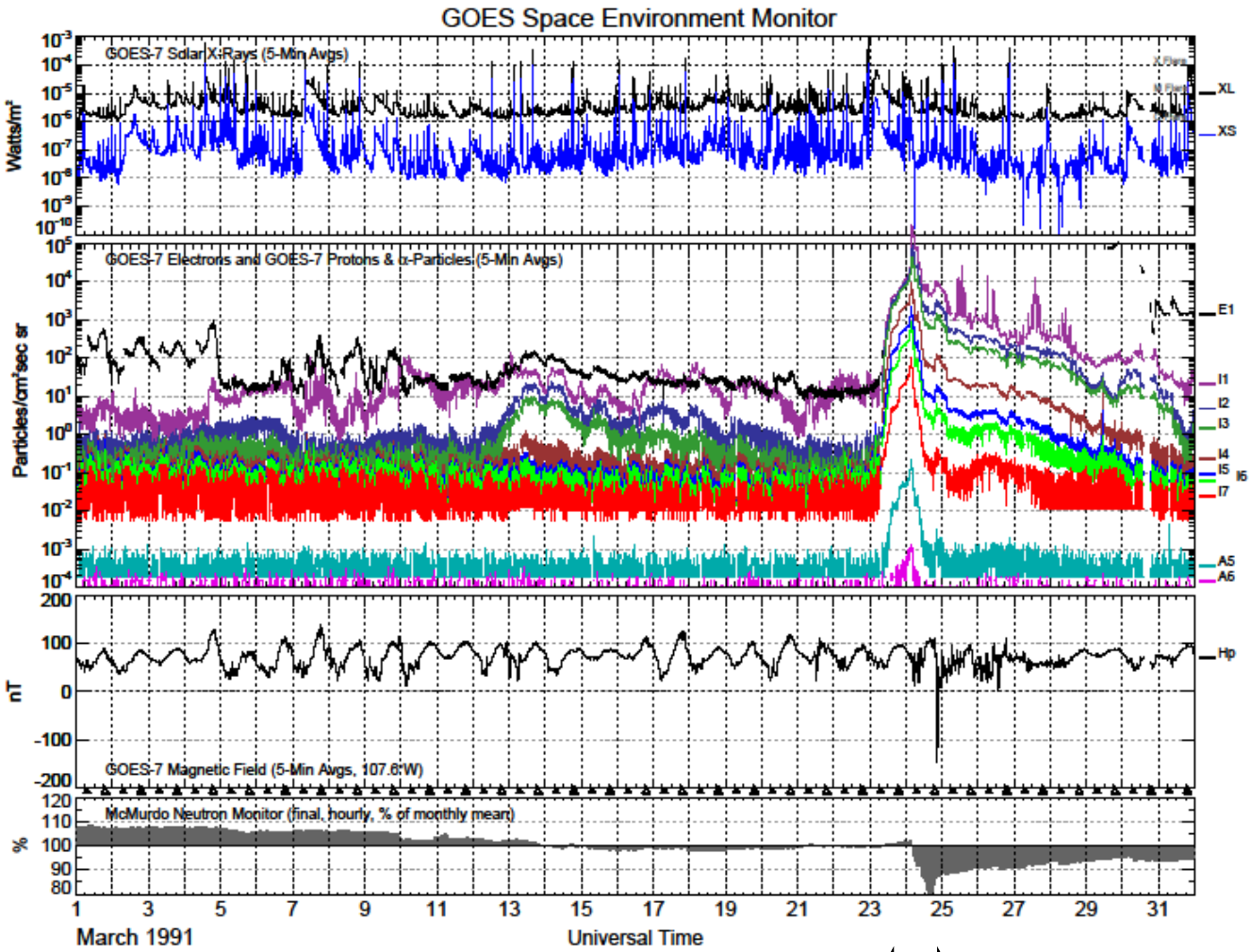
1989.09.29 GEO(13 commercial)
1989.09.30 05:39:44 GMS-3, GMS-4, GEO(13commercial)

Solar Energetic Particle (Protons)



1989.10.19 UOSAT 2
GOES-5

Solar Energetic Particle (Protons)



1991.03.22 BS 3A
1991.03.22-24 GOES-7

Solar Energetic Particle (Protons)

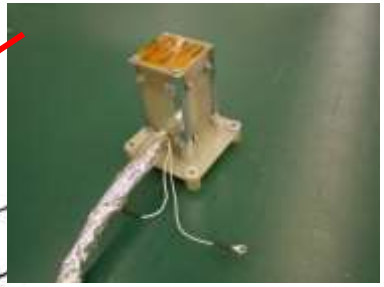
Space environment measurement

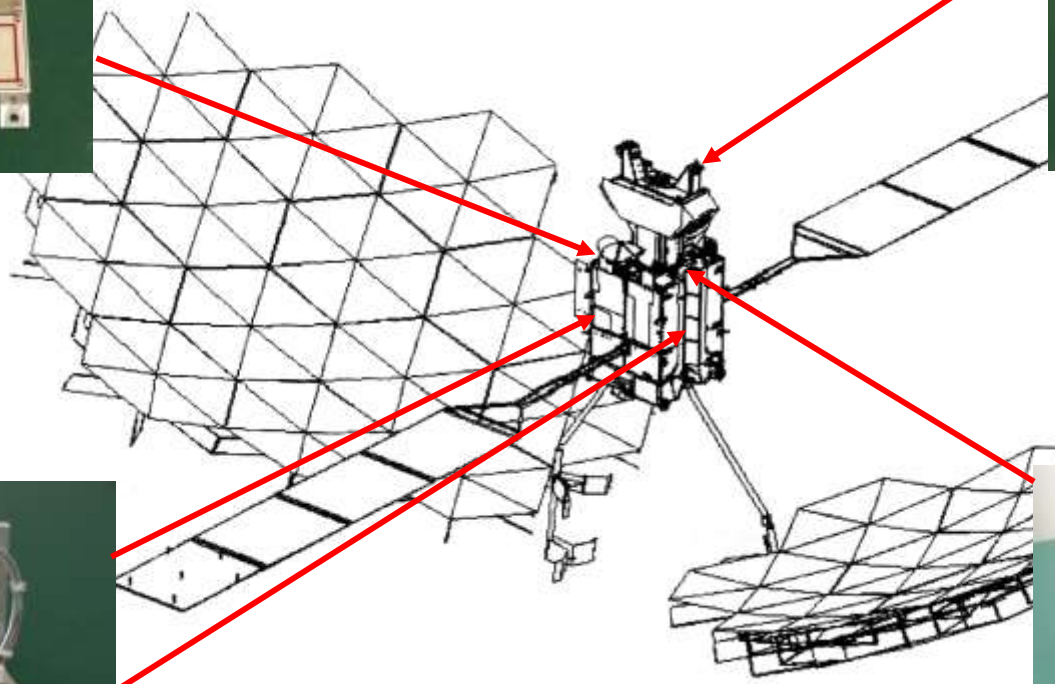
Satellite Name	Launch Data （Altitude）	Type
ETS-V	1987.8（36000km）	GEO
ETS-VI	1994.8（8000～38000km）	GTO
ADEOS	1996.8（800km）	LEO
ETS-VII	1997.11（500km）	LEO
STS-89	1998.1（300km）	LEO
ISS	2001 （400km）	LEO
MDS-1	2002.2（250～36000km）	GTO
DRTS	2002.9（36000km）	GEO
ADEOS-II	2002.12（800km）	LEO
ALOS	2006.1（700km）	LEO
ETS-VIII	2006.12（36000km）	GEO
Jason-2, 3	2008.6（1336km）	LEO
GOSAT	2009.1（700km）	LEO
JEM/SEDA-AP	2009.5（400km）	LEO
QZS 1, 3, 4	2010（Quasi Zanies Orbit ）	QZO

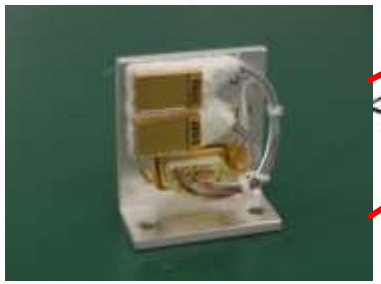
ETS-Ⅷ搭載宇宙環境計測機器

帯電モニタ

磁力計



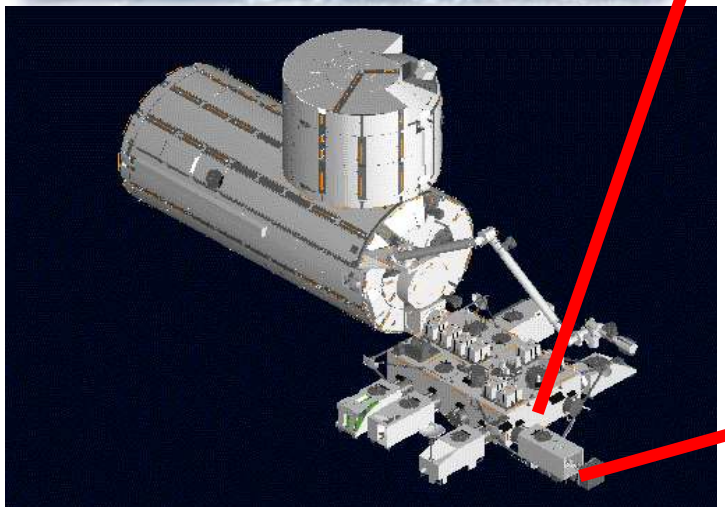


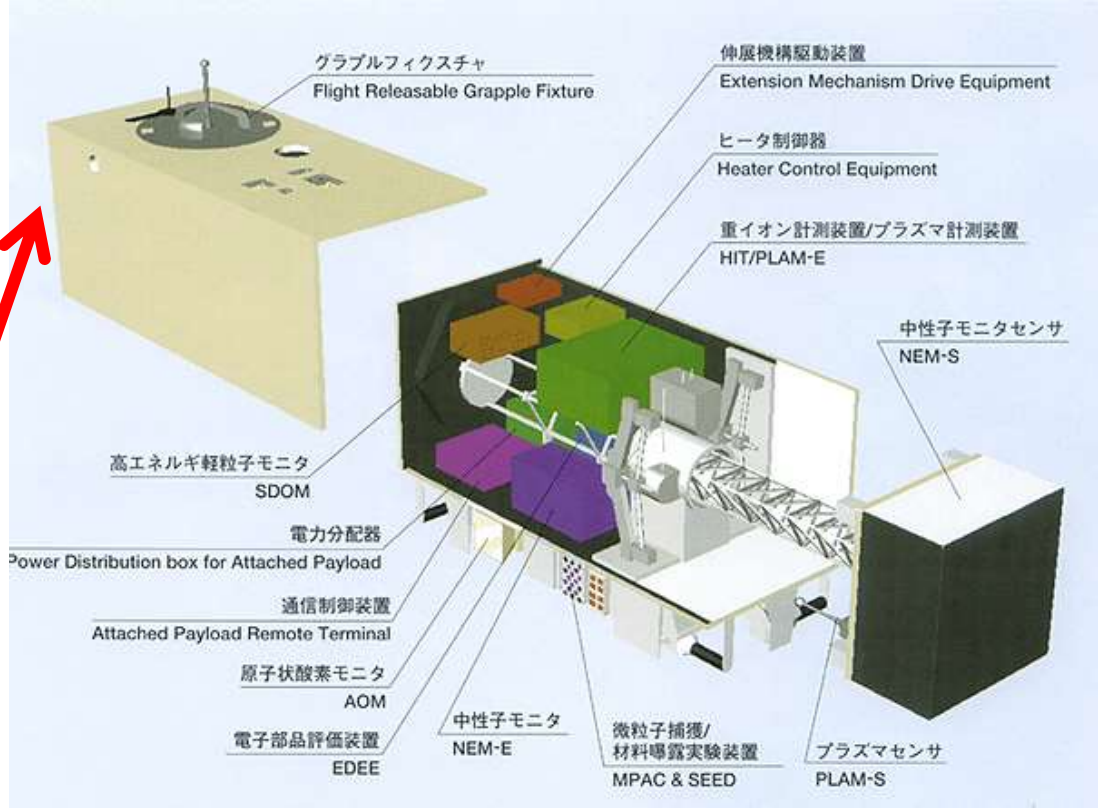


積算吸収線量計

シングルイベントモニタ

宇宙環境計測ミッション装置SEDA-AP



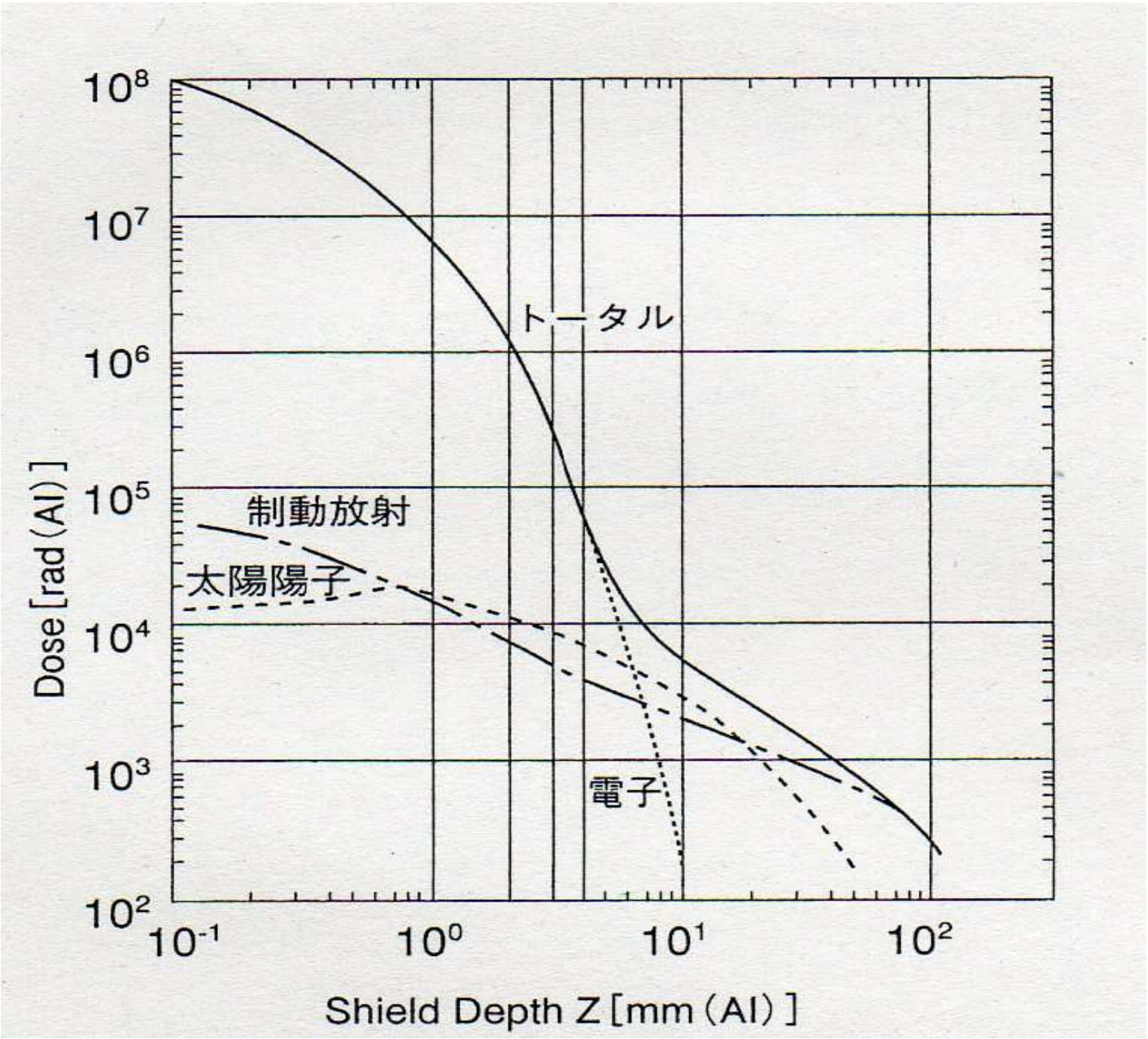


宇宙放射線（軽・重粒子、中性子）
プラズマ、原子状酸素、微粒子捕獲
材料・部品暴露実験

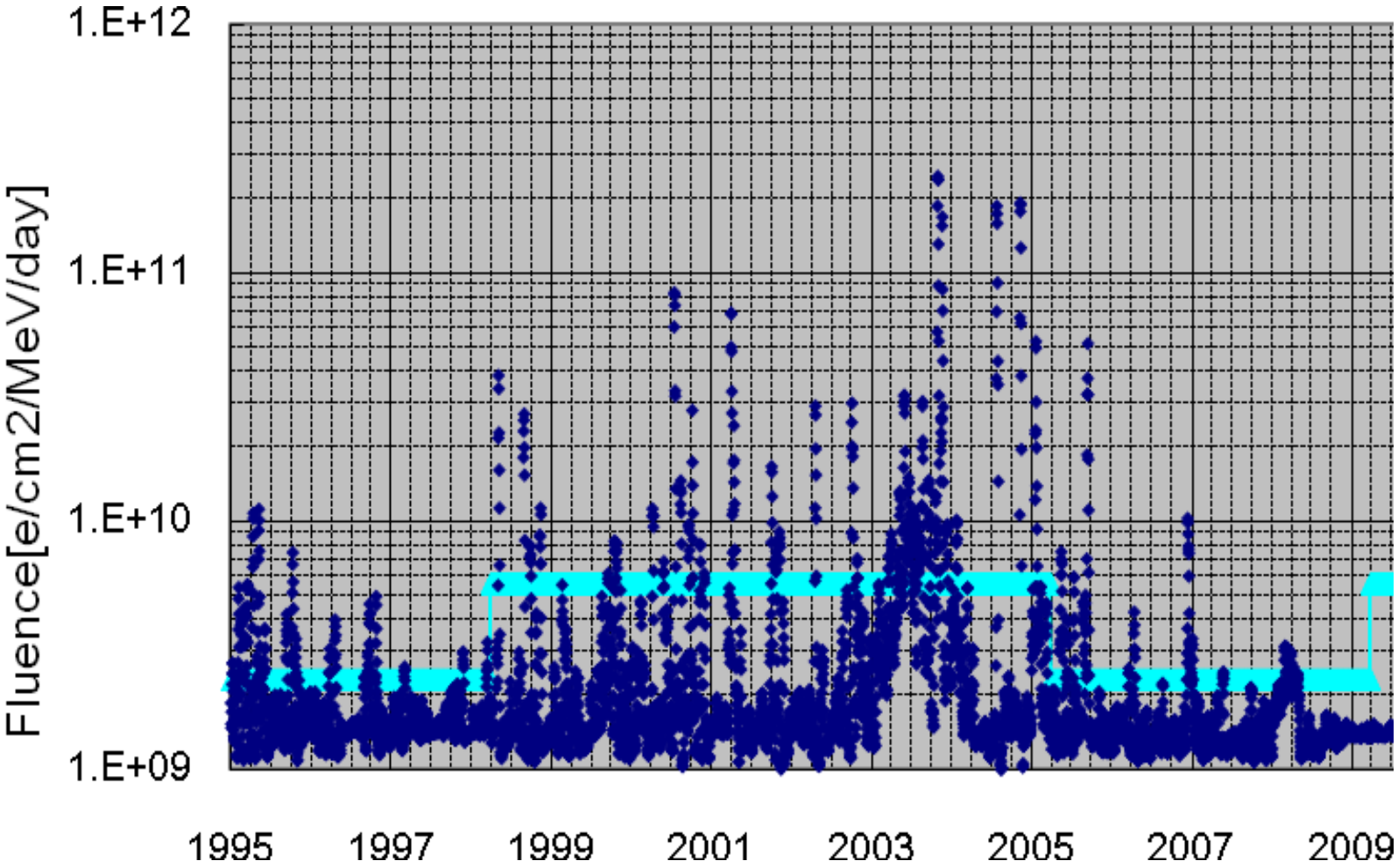
観測データを以下の2つの目的に
使用しています

1）適正なシールド厚を決めるために
精度の高い放射線モデルを開発します

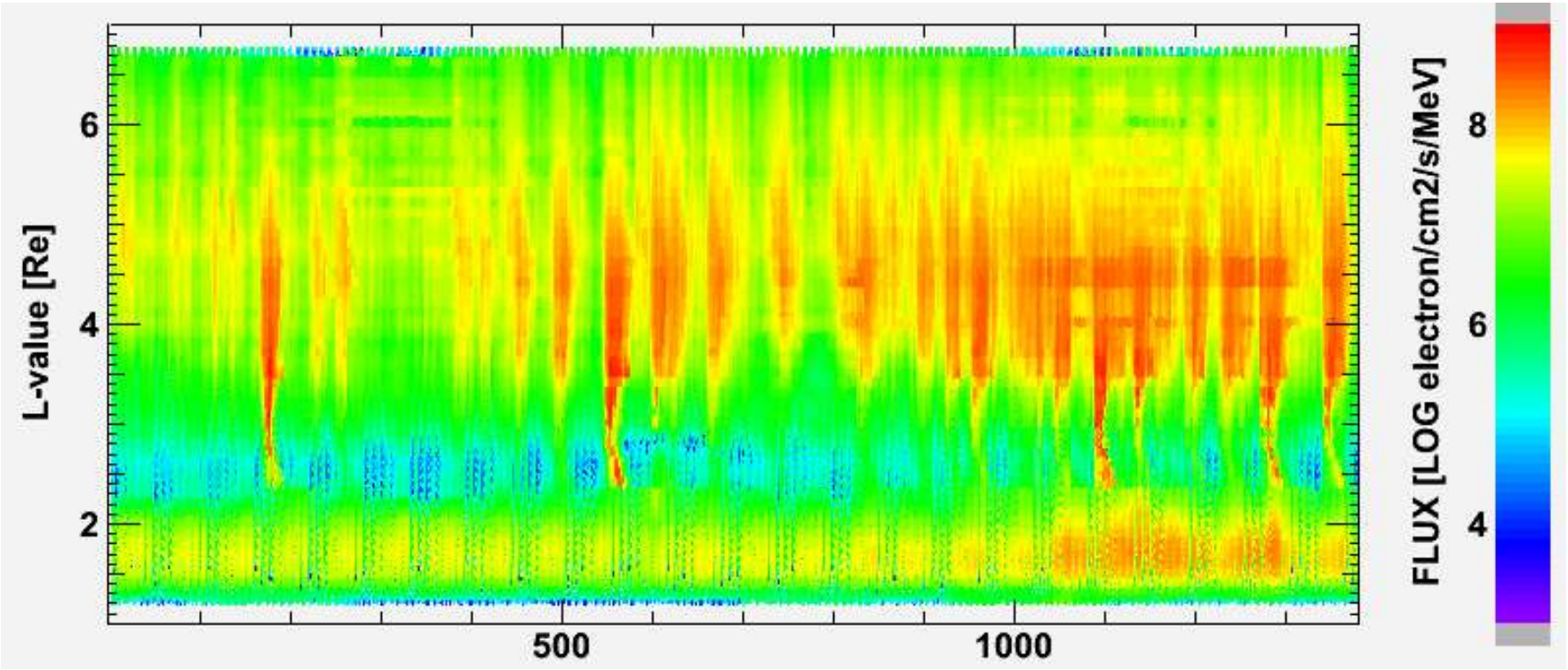
2）リアルタイムで観測データを処理して
衛星や宇宙飛行士に宇宙環境の危険
を、いち早く伝えます


10^8
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
Dose [rad (Al)]
トータル
制動放射
太陽陽子
電子
10^{-1}
10^0
10^1
10^2
Shield Depth Z [mm (Al)]

JAXA model vs. NASA model at LEO



JAXA で開発したモデル

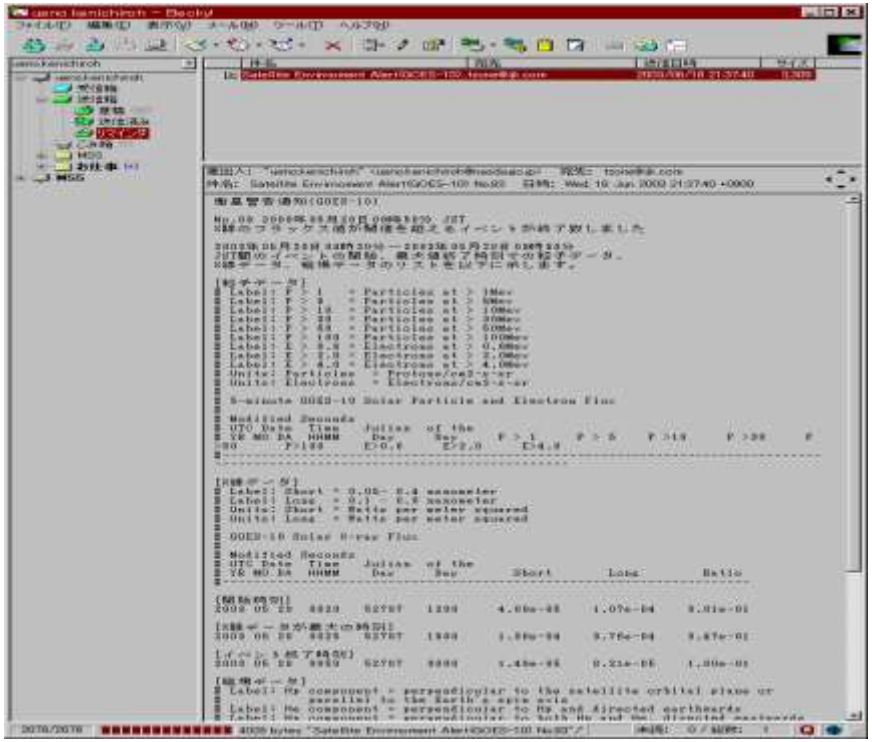


適正な被ばく量計算に接近

宇宙環境警報を通知します

・PC端末へのメール発信

・携帯電話などのモバイル端末
　に向けて衛星警告通知を発信



・放射線の突然の増加を
　予測する試みも開始

http://sees.tksc.jaxa.jp

国連ウイーン本部

国連ウイーン本部

宇宙空間平和利用員会（COPUOS）

宇宙活動の長期的持続性検討体制

長期的な宇宙活動が維持・持続できるための諸方策を検討する事を目的に設置されたWGで、活動期間は2011年から 2016年の 6か年である。

ガイドライン

前提方針	加盟国と同国内及び国際機関は宇宙天気の影響を考慮して，宇宙機の設計，打上，運用を行うべき。
勧告1	重要な宇宙天気データは全ての加盟国が利用できるようにすべき。
勧告2	高度な宇宙天気モデルと予報ツールの開発を支援し促進すべき。 宇宙天気モデルからの結果と予報に関する情報の共有と普及を支援し促進すべき。
勧告3	宇宙機の異常等宇宙天気の影響に関する情報の共有と普及を支援し促進すべき。
勧告4	宇宙天気の影響を低減するプラクティス情報の共有と普及を支援し促進すべき。
勧告5	地上ベース及び宇宙ベースの観測に関する協力と連携を促進すべき。
勧告6	宇宙天気の影響を理解するために，世界気象機関（WMO）を通じた教育と訓練を促進すべき。