

2013年2月26日

NICT 2012年度 宇宙天気ユーザーズフォーラム

講演 2 14:25-14:55

宇宙天気が超小型衛星に及ぼす影響

趙 孟佑(九州工業大学)



# 宇宙天気が超小型衛星に及ぼす影響

趙孟佑

九州工業大学 宇宙環境技術ラボラトリー

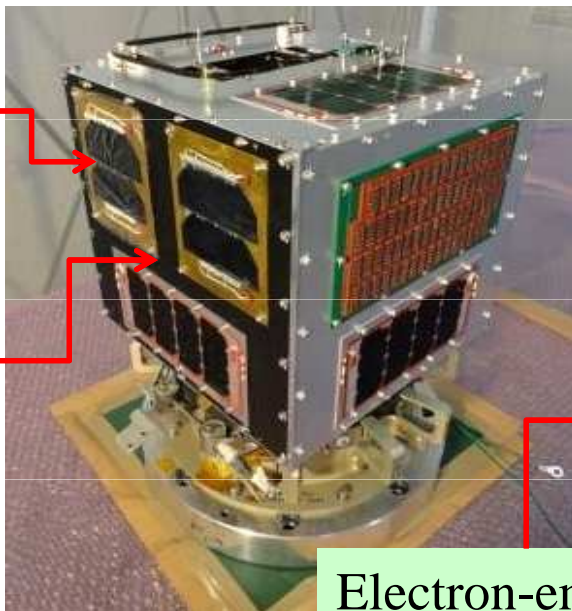
2013年2月26日

宇宙天気ユーザーズフォーラム

## 高電圧技術実証衛星「鳳龍弐号」

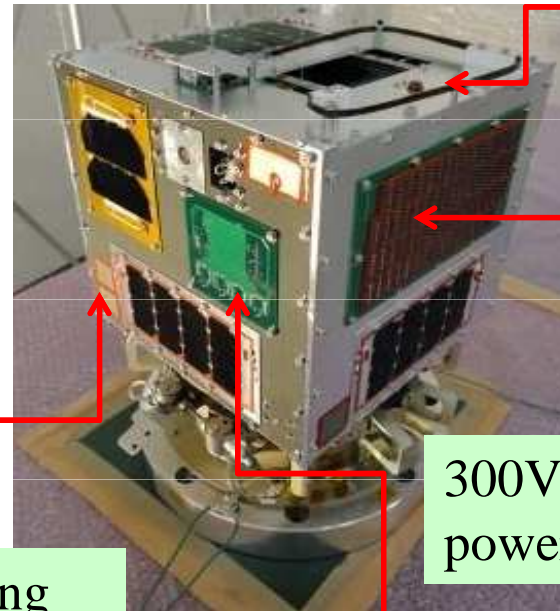
Solar array with arc mitigation design

Surface charging sensor



Electron-emitting film

Camera



300V Photovoltaic power generation

Debris impact sensor

九州工業大学の学生による開発(教育目的)

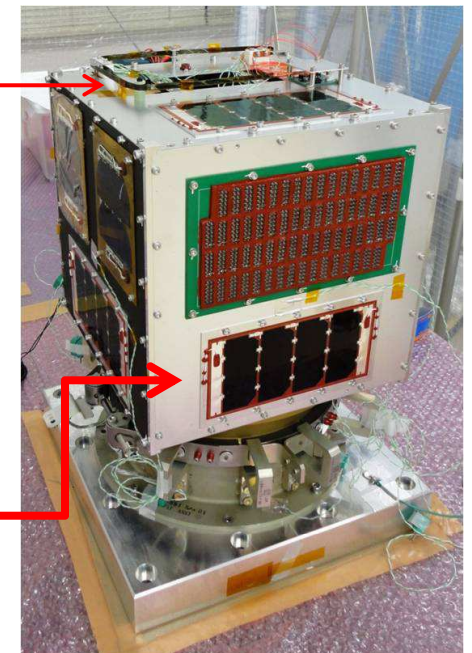
30cm cube, 7kg 680km, 太陽同期

高電圧技術(300V太陽光発電等)、衛星帯電観測・防止、  
デブリ観測、地球撮影

アマチュア無線バンド、受動的姿勢制御

# 鳳龍弐号の開発方針 (1/2)

- 鳳龍1号の設計をできるだけ引き継ぐ
  - ある程度は実証済みで細かいところまで理解
- 学生の技術レベル
  - 受動的制御
  - 最低限の展開
    - アンテナのみ
  - 外注
    - 電子部品のハンダ付け
    - 構造部品の機械加工
    - 設計と組立は学生
  - 太陽電池は宇宙用太陽電池メーカーから調達
    - 予め4直列につなぎかばーをつけてもらう



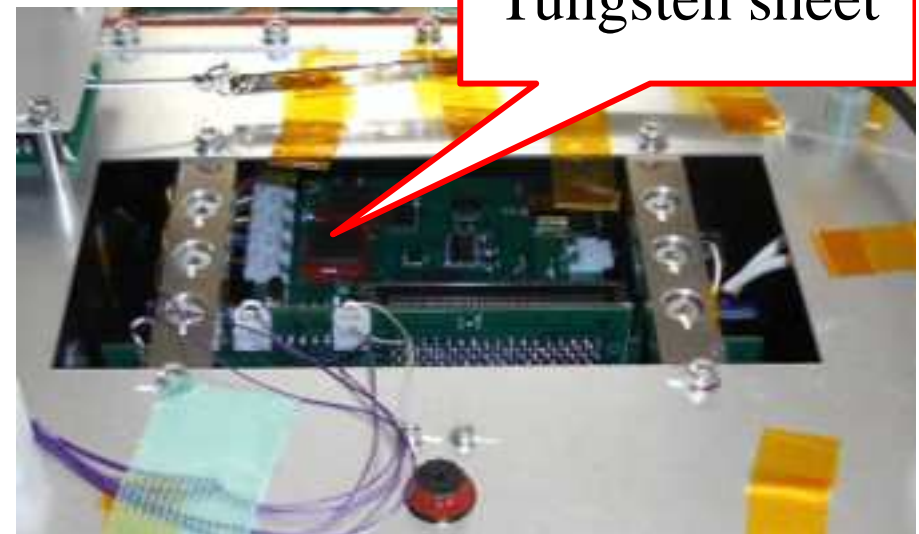


## 鳳龍弐号の開発方針(2/2)

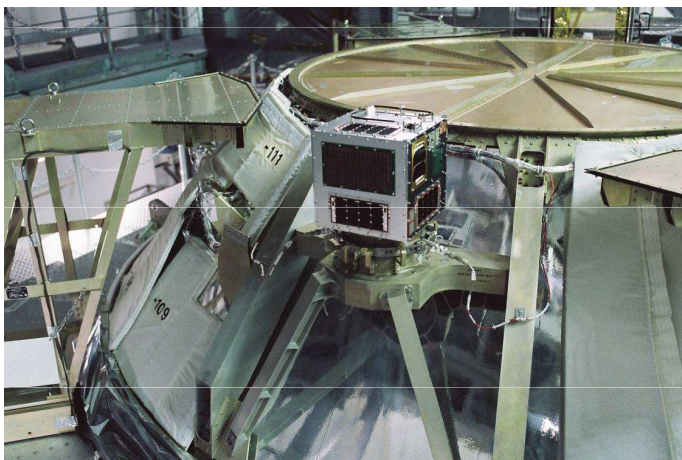
- スケジュールをコストに優先させる
  - 複数部品を購入して、同時並行の開発
    - 各段階で3枚の基板
- できるだけ試験
  - 九工大の試験設備
  - 放射線試験はしない
- リスク管理
  - できる限り衛星喪失につながる単一故障点は避ける
    - 限界あり
- 検証要求を設計要求と同時に策定

# 耐放射線対策

- 概念設計段階で以下を決定
  - トータルドーズ
    - ミッション期間が1年であるため、試験しない
      - 後付けの試験( $\gamma$ 線) で 8.7kRadまでの耐性を確認(2011年末)
  - シングルイベント
    - 3時間毎の定期リセット、二つのマイコンによる相互監視
    - 3mm厚のタングステンシートによる局所遮蔽
    - 過電流防止回路
      - 0.5Aで動作
    - 試験を計画せず



# 打ち上げ



H2Aロケットに取り付けられた鳳龍  
式号(写真提供JAXA)



2012年5月18日午前1:39(日本時間)頃の九工大

# 分離

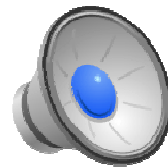


軌道上での分離直後の様子  
2012年5月18日午前2:30頃(日本時間)



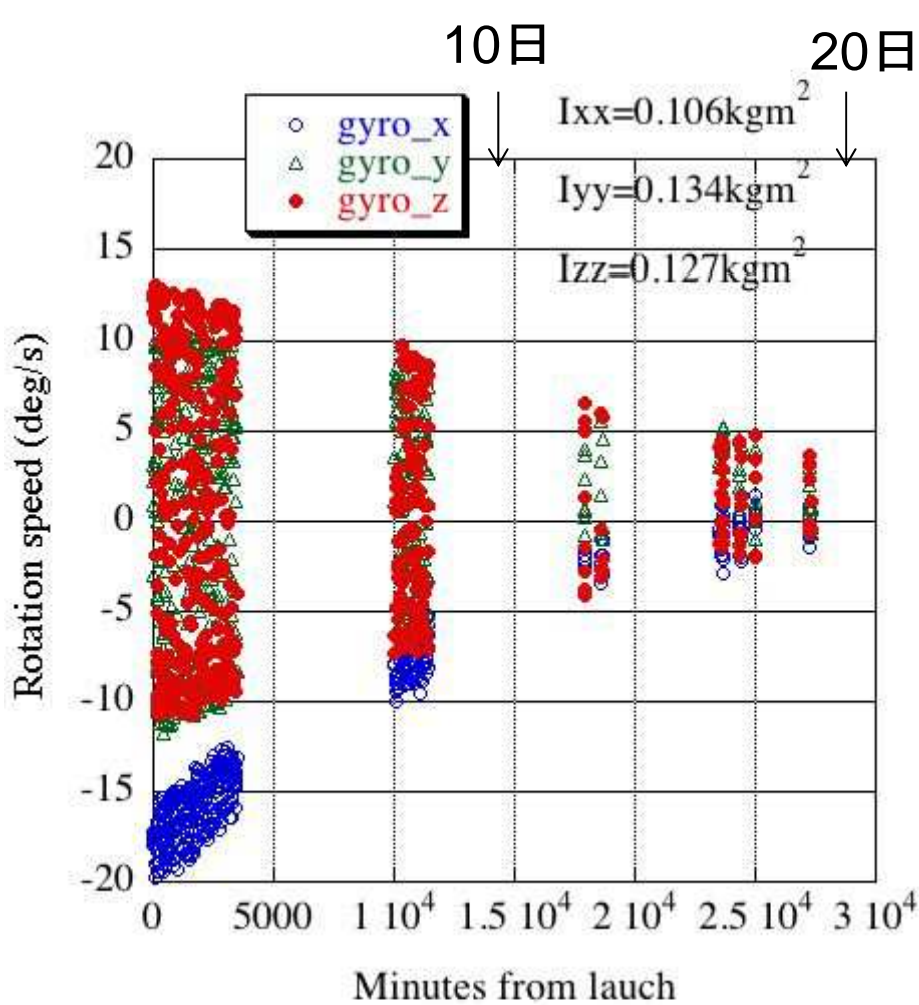
# 産声

2012年5月18日午前3時28分 九工大局にてビーコン信号を確認!!

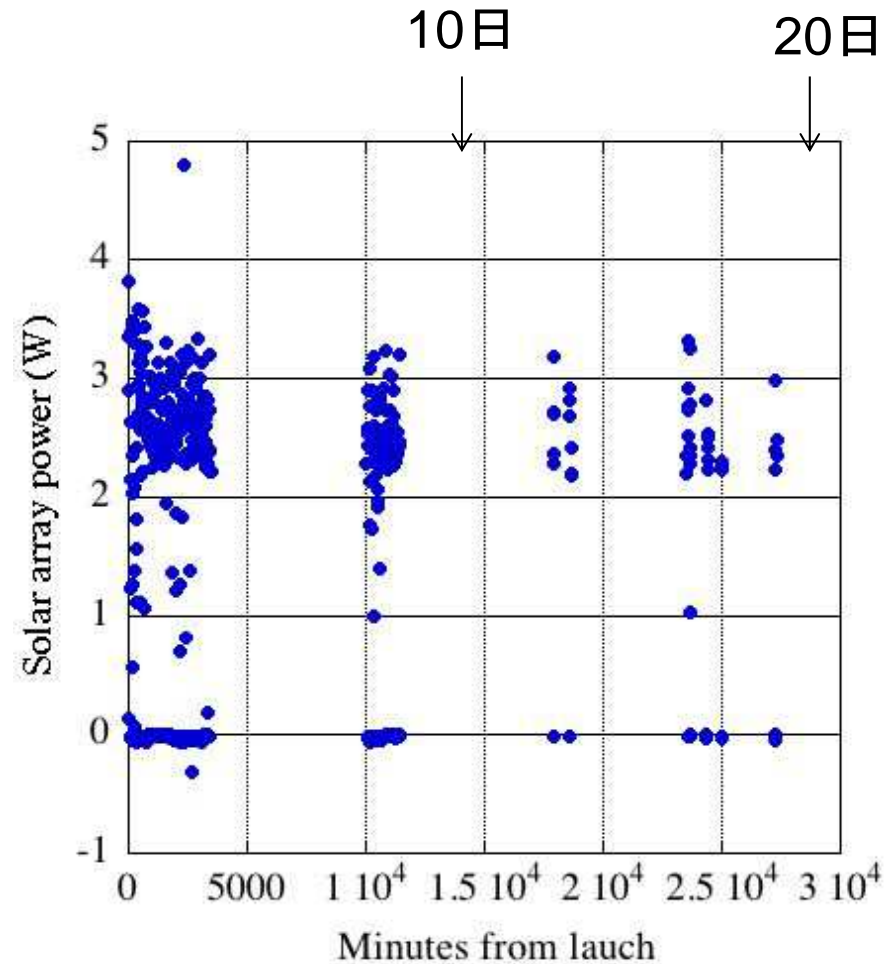


# 打ち上げ後

- 至極順調に飛行を続ける



回転速度が減衰していく様子



太陽電池の発電電力



# 不具合発生(6月5日)

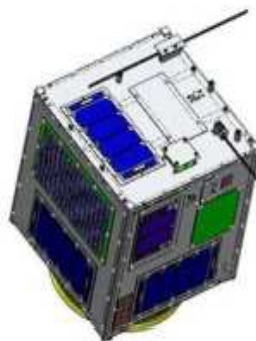
- リアルタイムHKデータの内容が更新されない。
- リアルタイムHKデータに含まれるキルスイッチのステータスの一つがONを示す
- 詳細センサデータ等をダウンリンクさせようと地上からコマンドを送っても、コマンドの受信を確認する信号が返ってくるのみで、データが送られてこない。
- 地上から強制リセットコマンドを送っても、上記の事象が変化しない。

JG6YBW HORYU 123456789ABCDEF  
└──────────┘ └──────────┘  
Call sign Housekeeping data

# 運用モード

通常運用モード

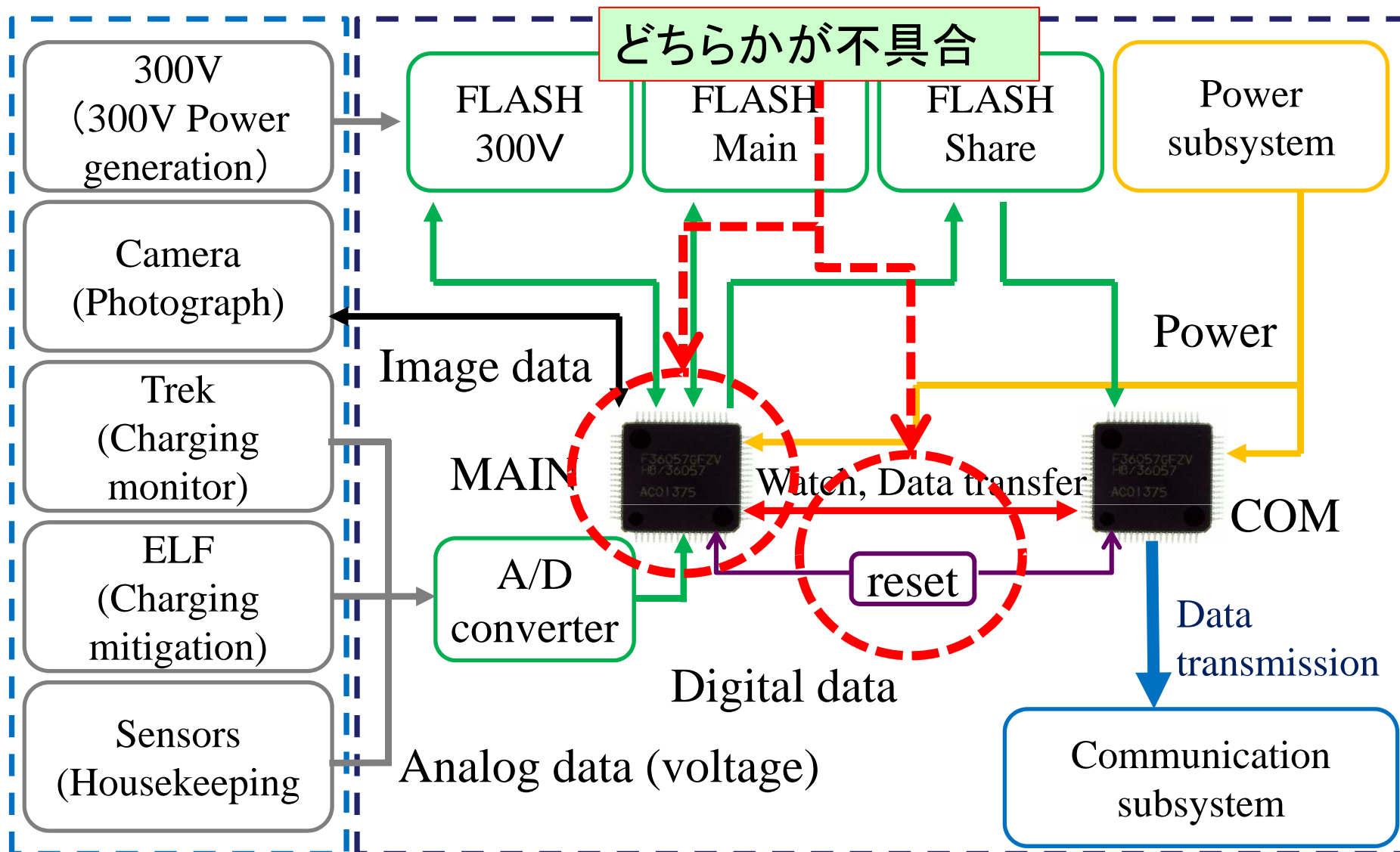
FMダウンリンク  
ミッションモード



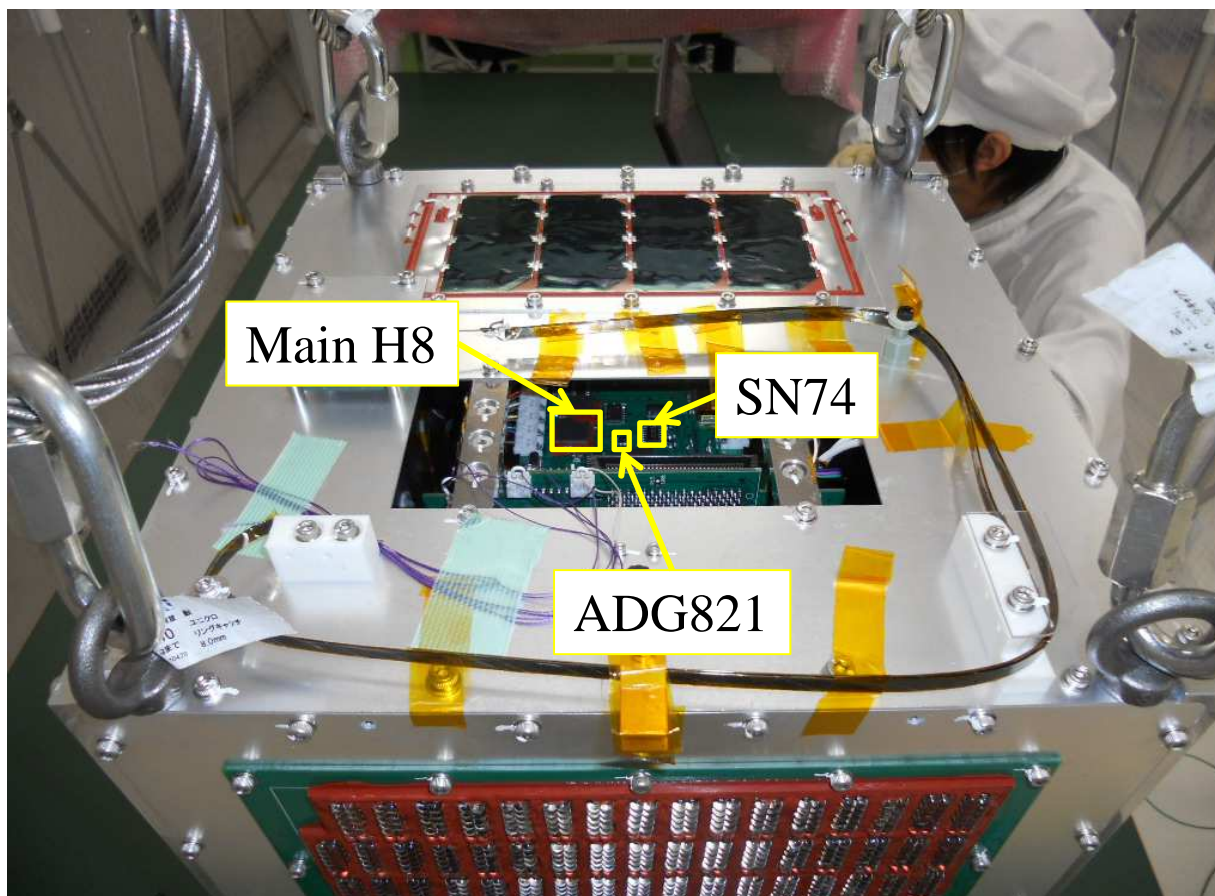
地上局からのコマンド

- CW 信号送信
  - ビーコン+リアルタイムHK (モールス)
- HK データ取得(10分毎)
  - フラッシュメモリに保存
- 3時間毎の定期リセット

# OBC subsystem



# 故障発生箇所



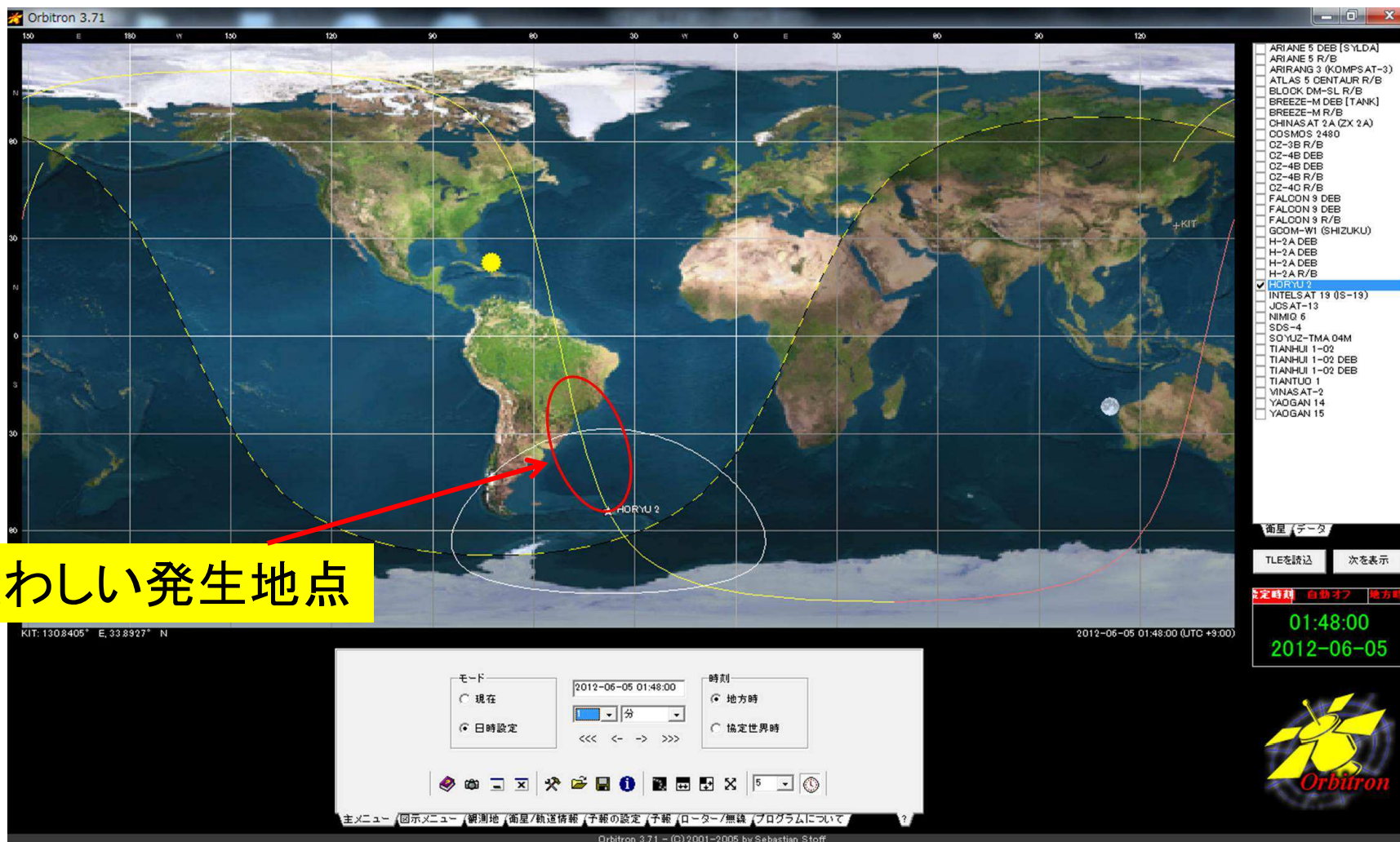
MPU or parts related to resetting



# 不具合発生地点

宇宙天気は静穏

- 不具合は 01:08 2012/06/05 と 02:35 2012/06/05の間で発生
- 固定されたリアルタイムHKデータは蝕明け後10~20分を指し示す



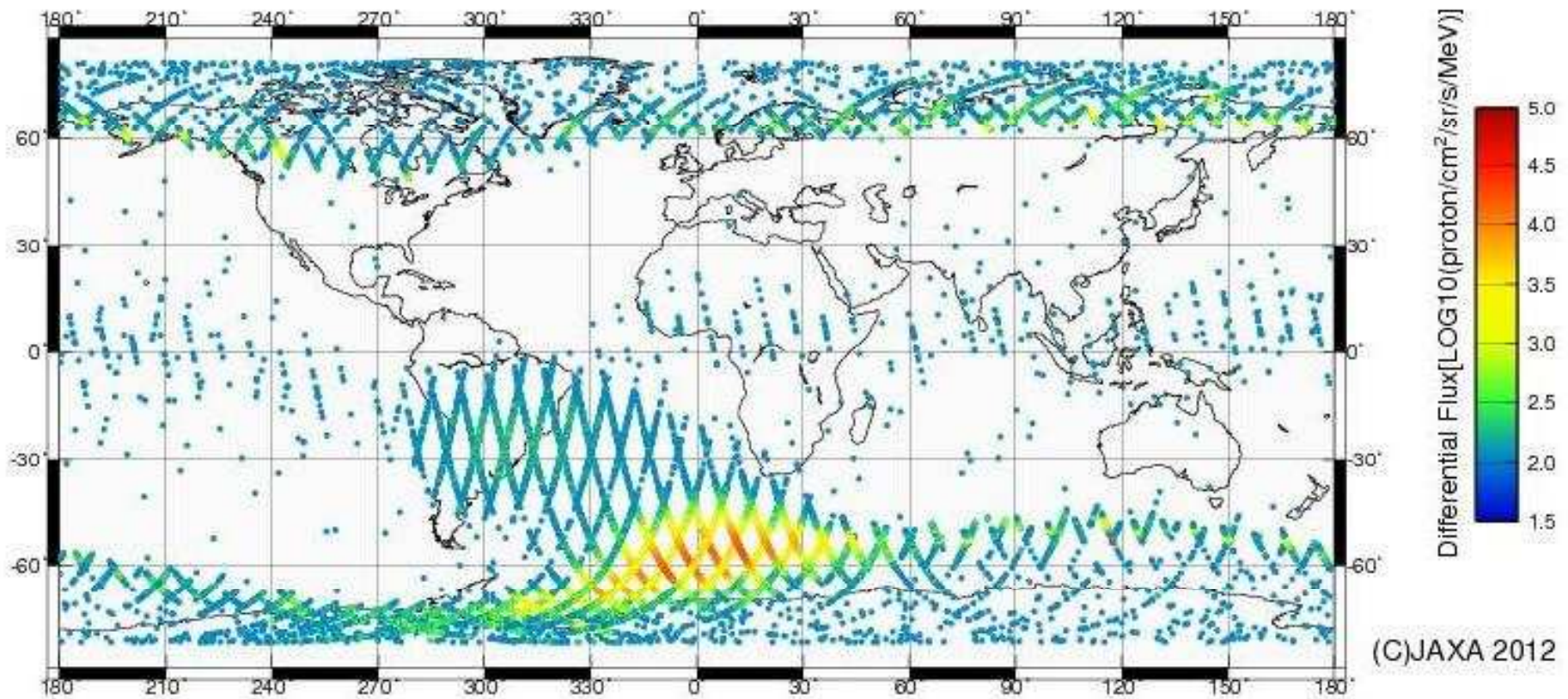
最も疑わしい発生地点

# 南大西洋異常域

ブラジル南東沖は最も放射線(電子や陽子)が強い領域として知られる

GOSAT Differential Flux (Proton: 1.00-1.20 MeV)

2012/06/03 - 2012/06/05(UT)

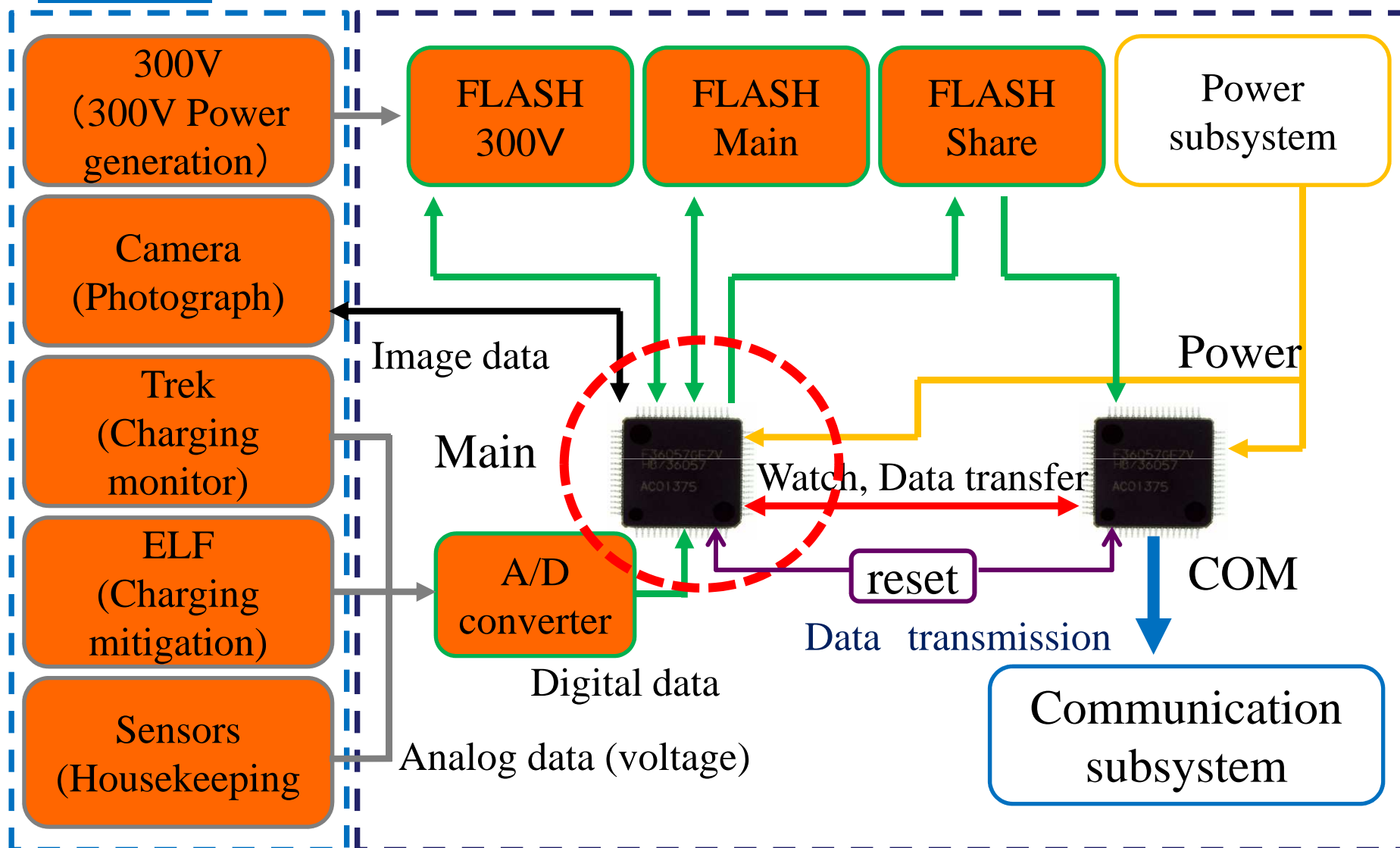




# OBC subsystem

センサー、ミッション機器にアクセスできず、ビーコンのみ

## Mission

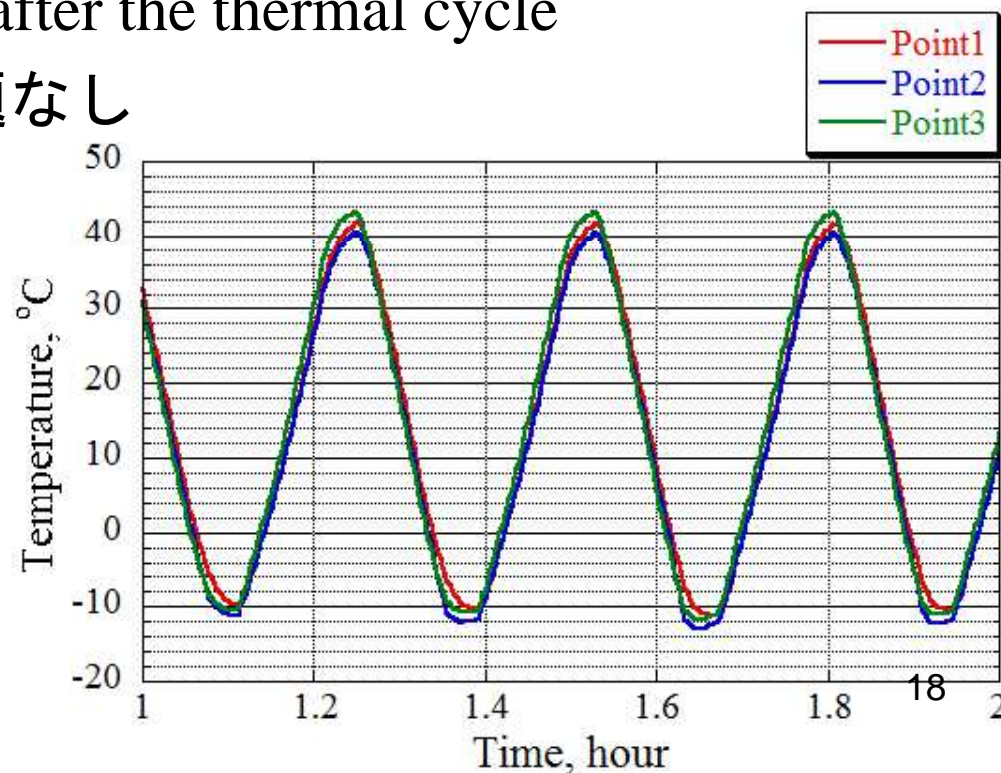
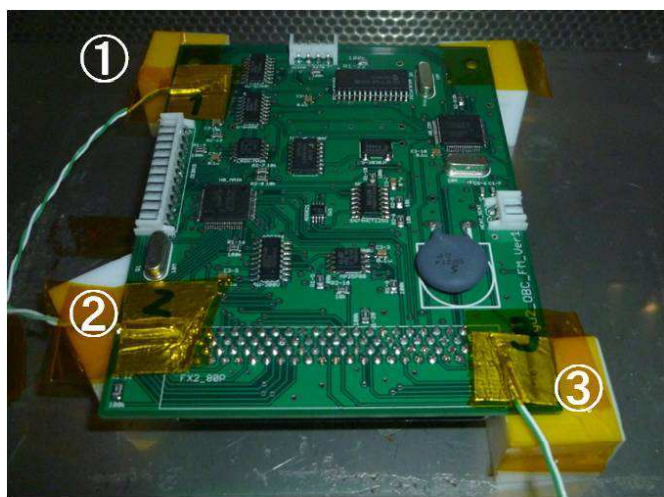


# 推定故障原因

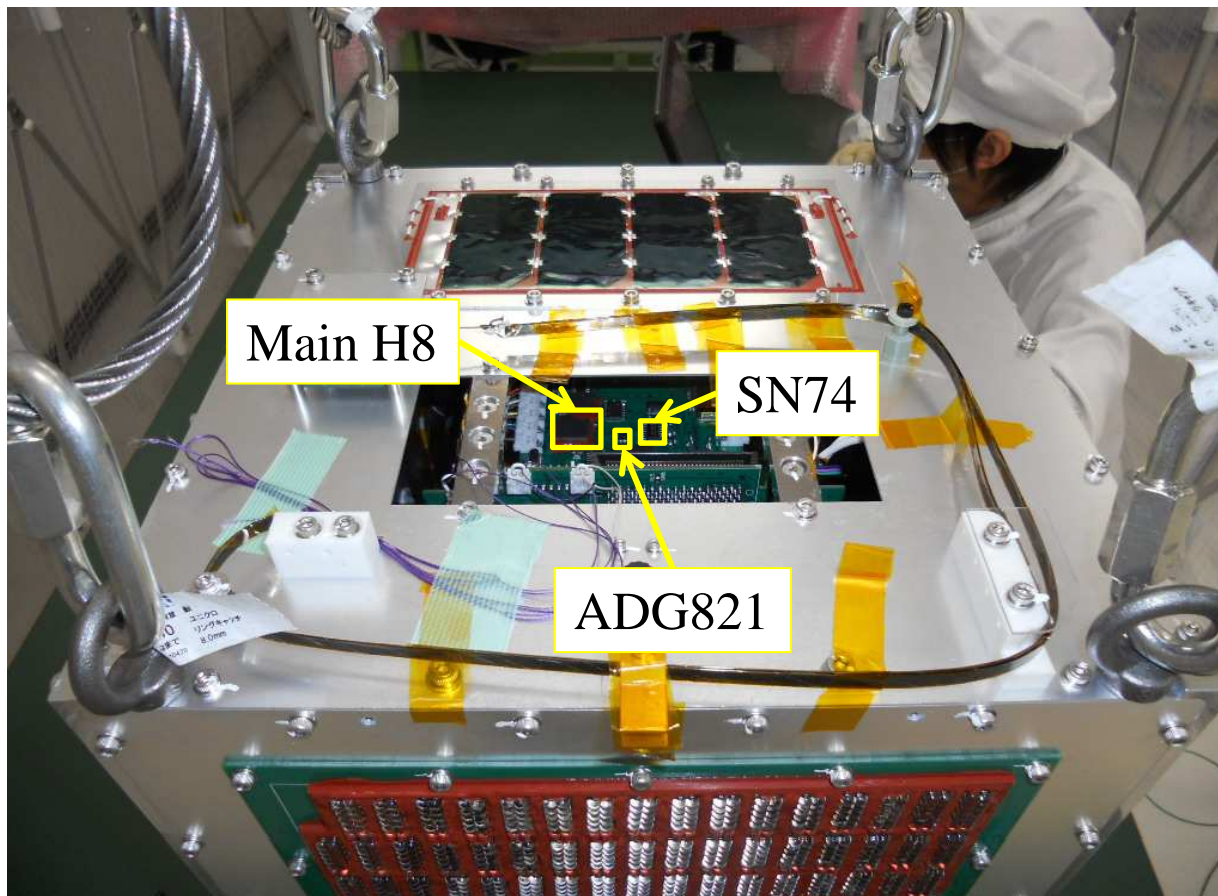
- 熱サイクルによる素子ハンダ部で不良が発生
  - 熱サイクル試験で確認
- 内部帯電によってOBC基板上で放電が発生
  - 帯電試験
- 外部から異物が混入し、基板上で短絡が発生
- リセット素子が放射線の影響をうけて故障
  - シングルイベント試験
- マイコンがシングルイベント(SE)により暴走
  - シングルイベント試験
- その他

# 熱サイクル

- 予備基板を使用
  - 軌道上データは $-5\sim 25^{\circ}\text{C}$ 、殆どが $0\sim 20^{\circ}\text{C}$ で300サイクル
- 試験条件
  - 600サイクル、15分/サイクル
  - $-10^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$
  - 窒素ガスElectrical check after the thermal cycle
  - 外観、電気性能とも問題なし

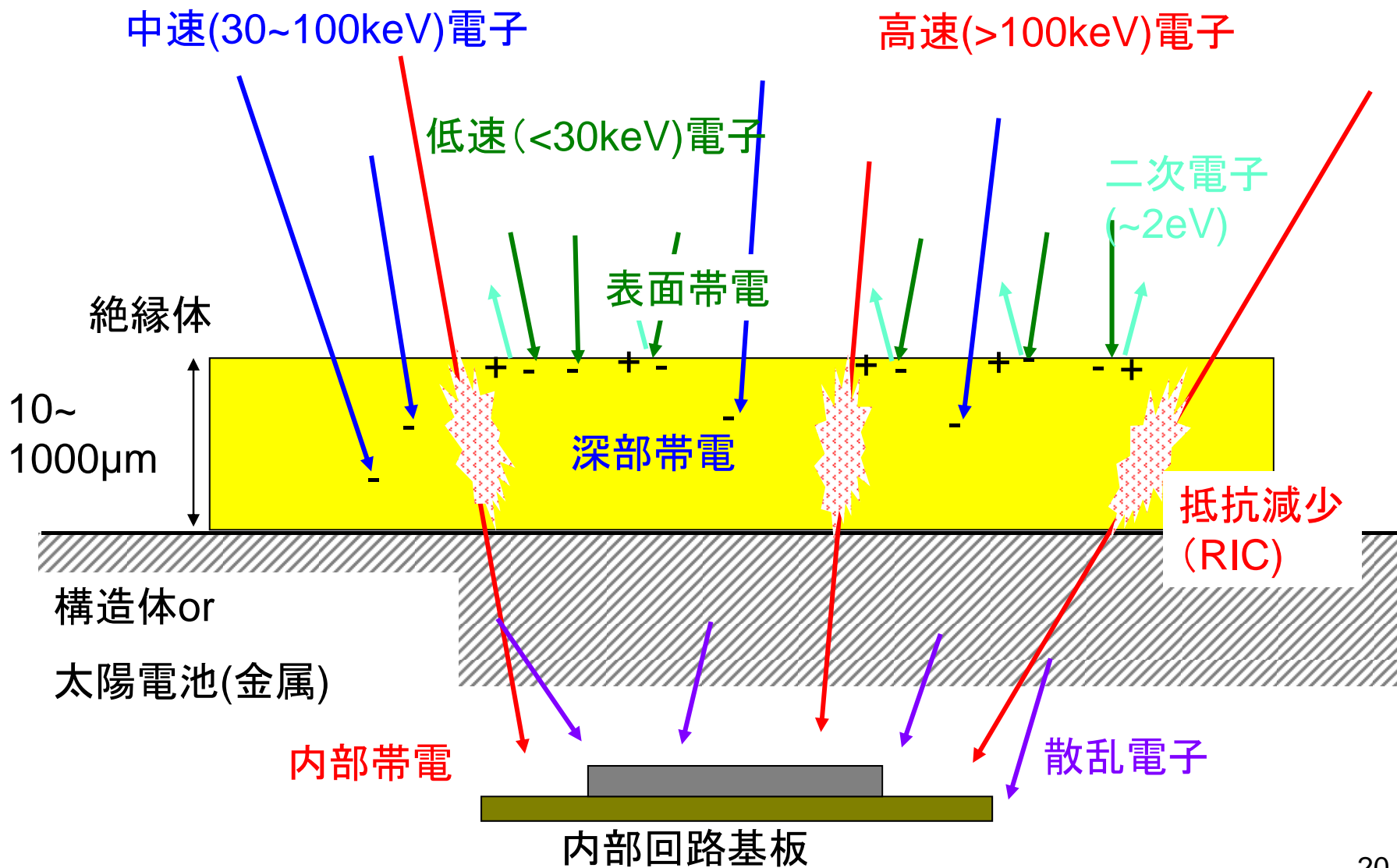


# 内部帯電



OBC基板は1mm厚のアルミ板で守られているだけ

# 表面帯電、深部帯電、内部帯電



# 内部帯電

## CHARGED PARTICLE INTERACTIONS PROTON/ELECTRON ENERGY vs PENETRATION DEPTH FOR AL

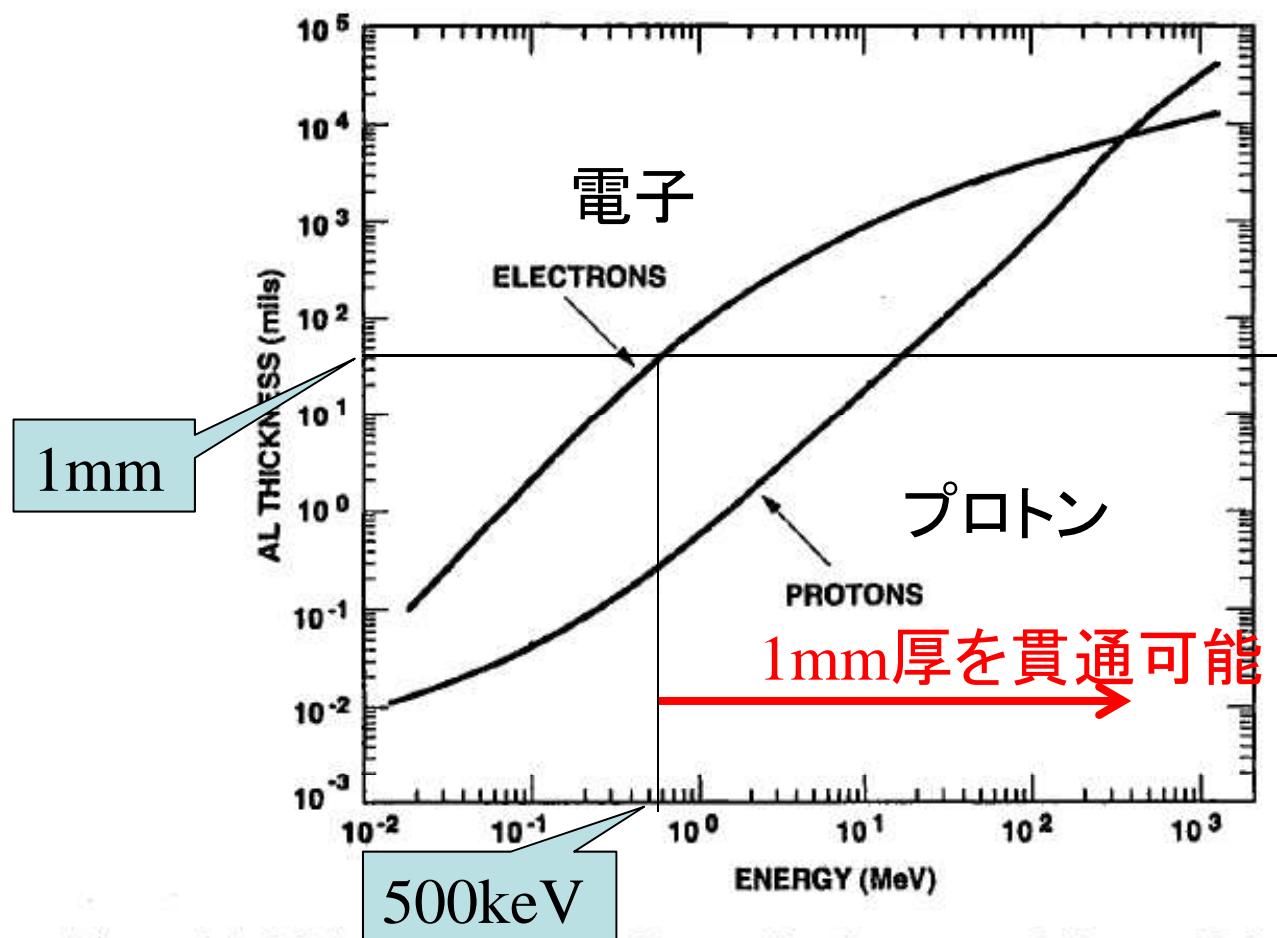


Figure 6.4. Minimum Penetration Energy for Electrons and Protons Relative to Shield Thickness.

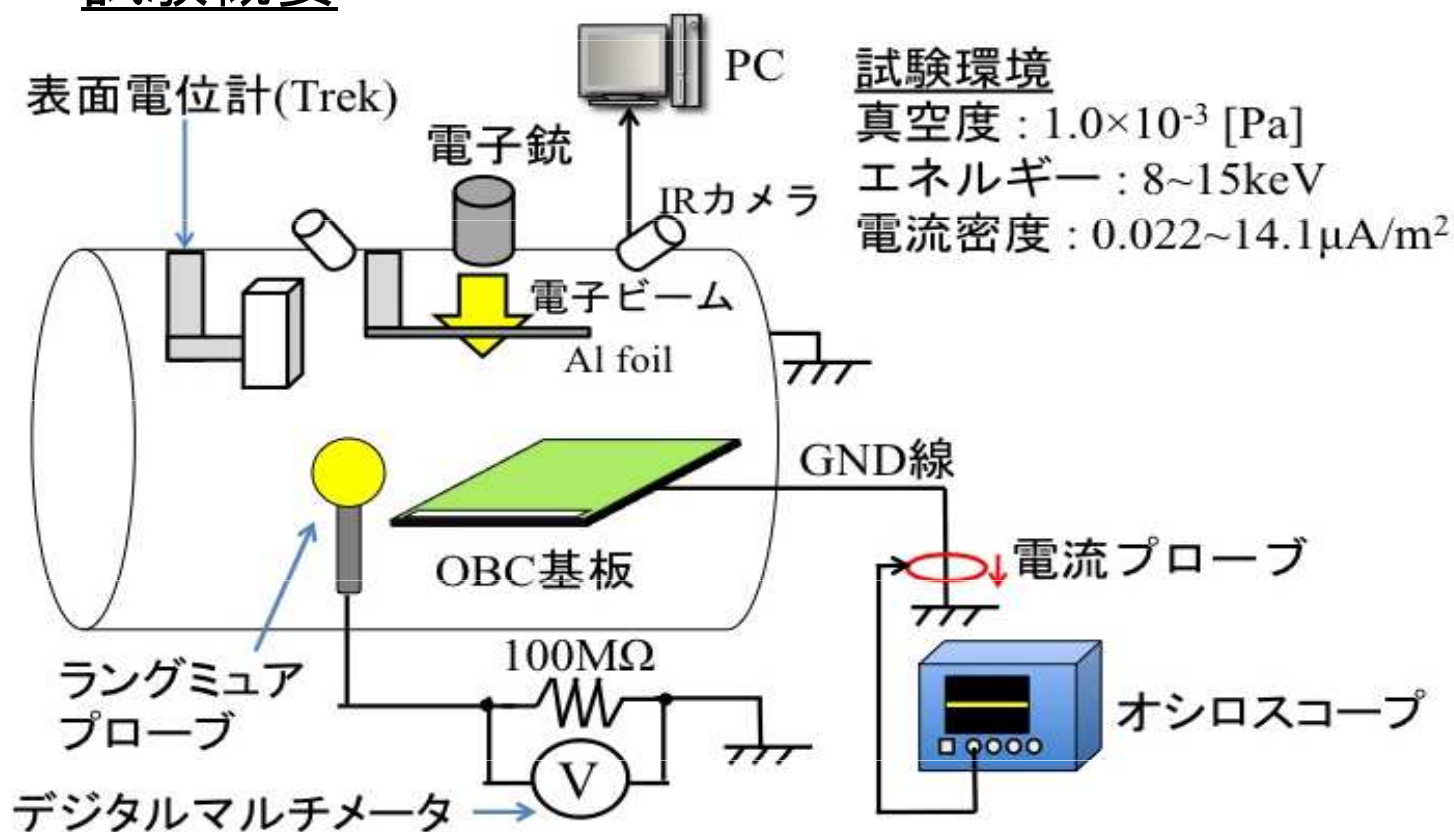
*Hastings and Garret, "Spacecraft Environmental Interactions", Cambridge University Press*

# OBC基板帯電放電試験

## 検証項目

2. 内部帯電によってOBC基板上で放電が発生

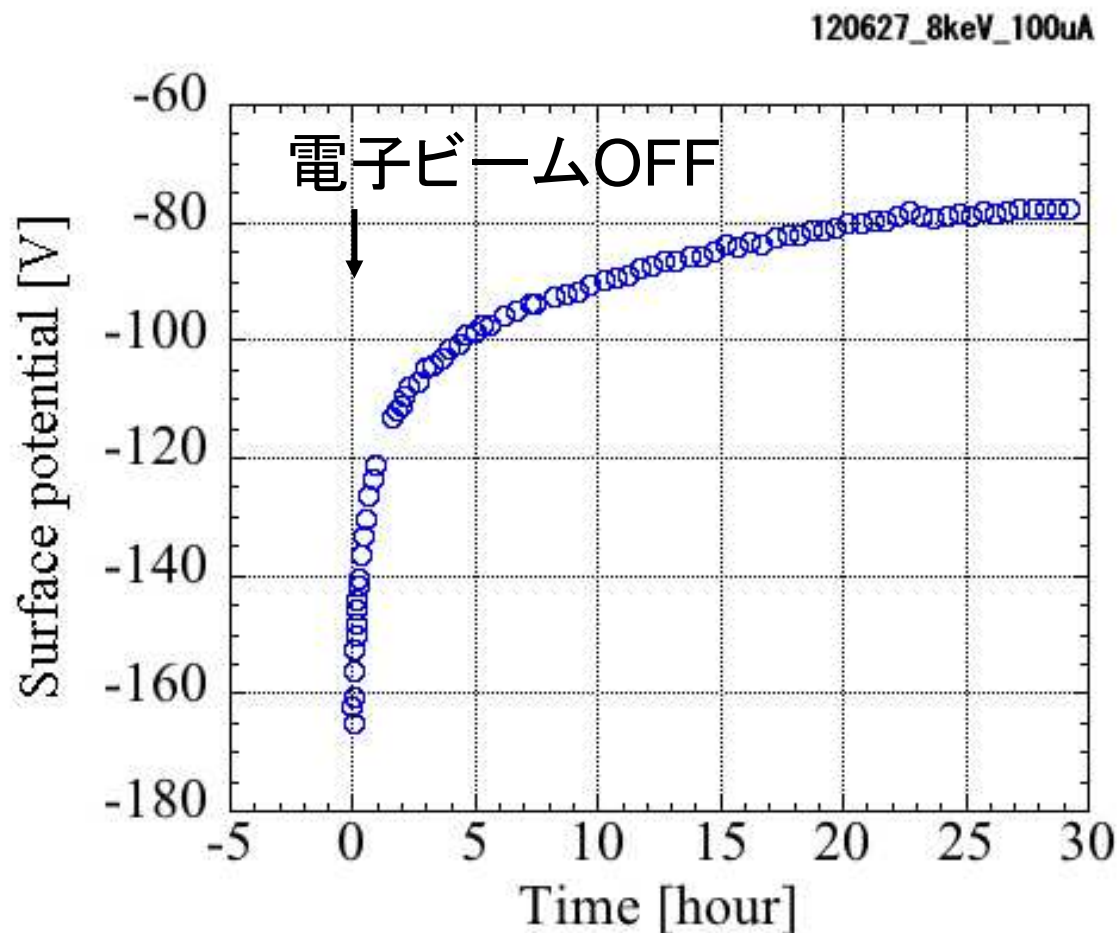
## 試験概要



帯電試験  
↓  
電荷の抜け測定  
  
放電試験  
↓  
放電閾値の導出

# 回路基板上の電位の緩和時間

回路基板表面  
電位(V)

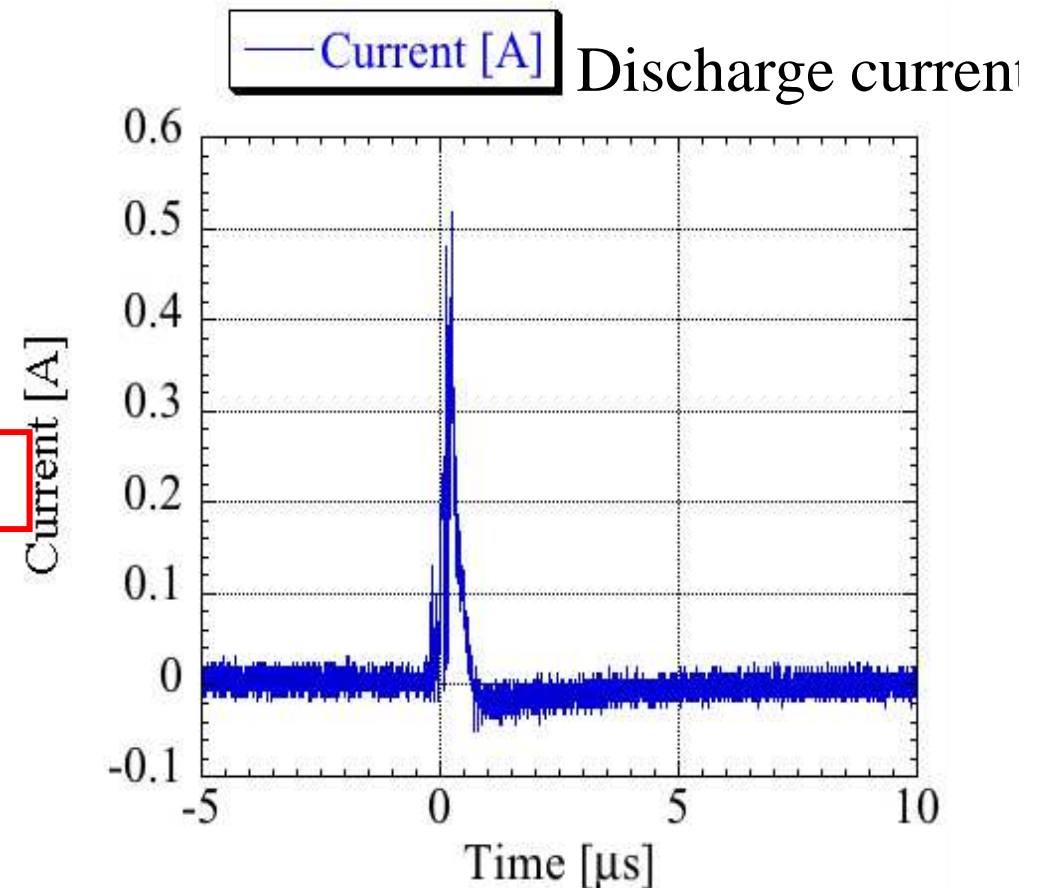
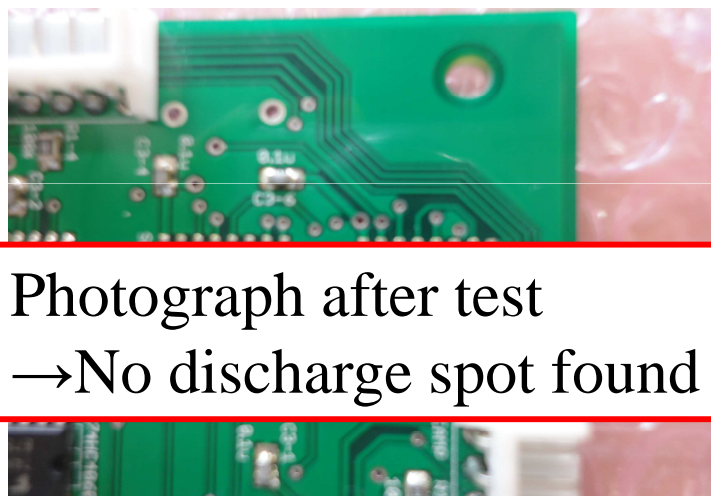
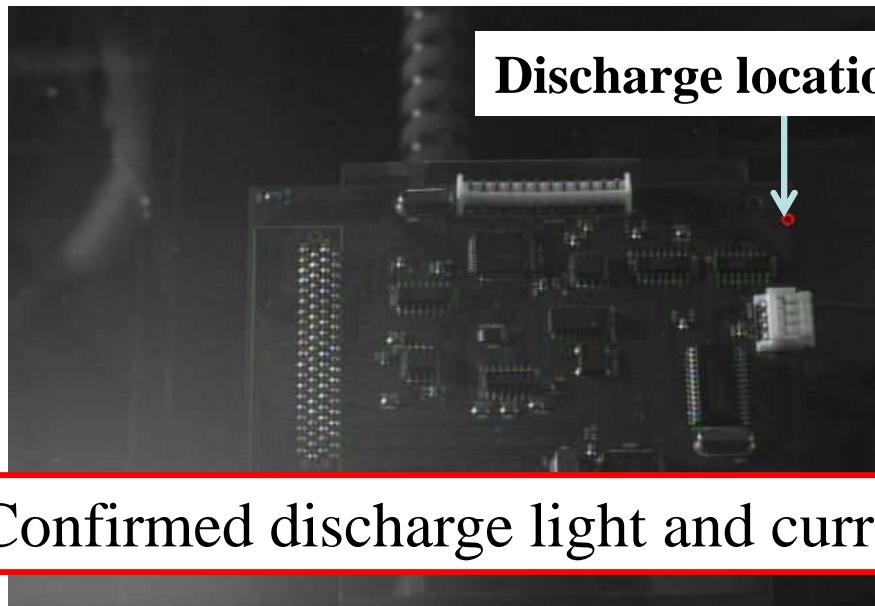


電荷の抜けは非常に遅い（～時間）

帯電粒子との繰り返しの遭遇により、帯電していく可能性



# 放電の確認



放電発生を-3.5kVで確認

# 内部帯電

- 500keVの電子であれば1mm厚のアルミを貫通
- 帯電試験を実施
  - 基板上の帯電電荷は数時間経っても消えない
  - -3.5kVまで帯電したところで放電を確認
- GOSATのデータ解析
  - 平均して $1 \times 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>の電子電流
- 3週間では、-3.5kVまでは帯電できない（1桁は足りない）
  - 基板の容量による( $4.4 \times 10^{-7}$  F/m<sup>2</sup>と仮定)

今回は多分大丈夫。ただ、宇宙天気が荒れた時や、長時間経過時は要注意



# 事態の悪化

- 2012年6月30日13時4分
  - コールサインに続くハウスキーピングデータを受信できず

JG6YBW HORYU



Call sign

~~123456789ABCDEF~~



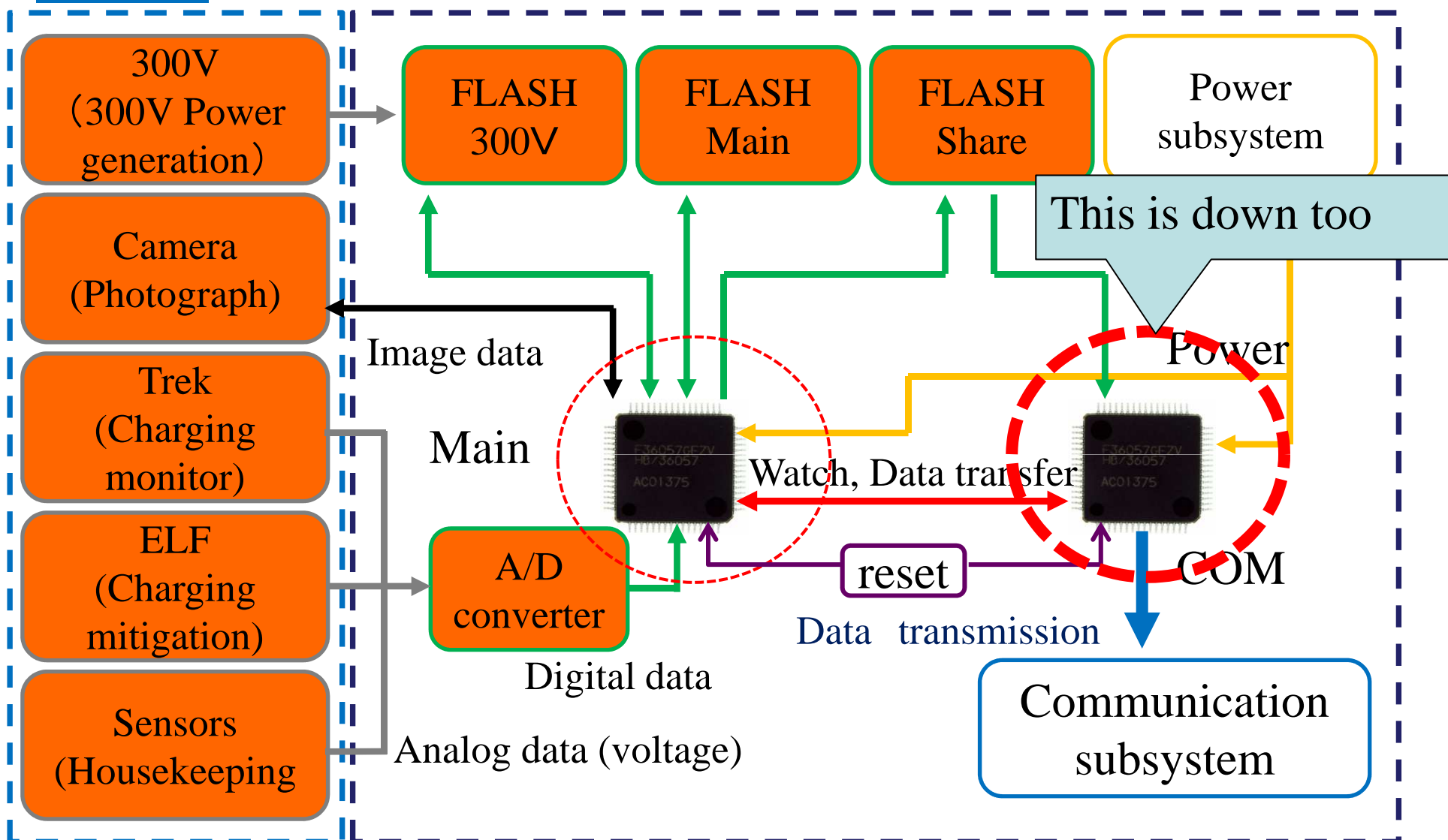
Housekeeping data

- コールサインはかろうじて受信
- コールサインが消えると万事休す

# OBC subsystem

No access to sensors, mission payload, only beacons

## Mission

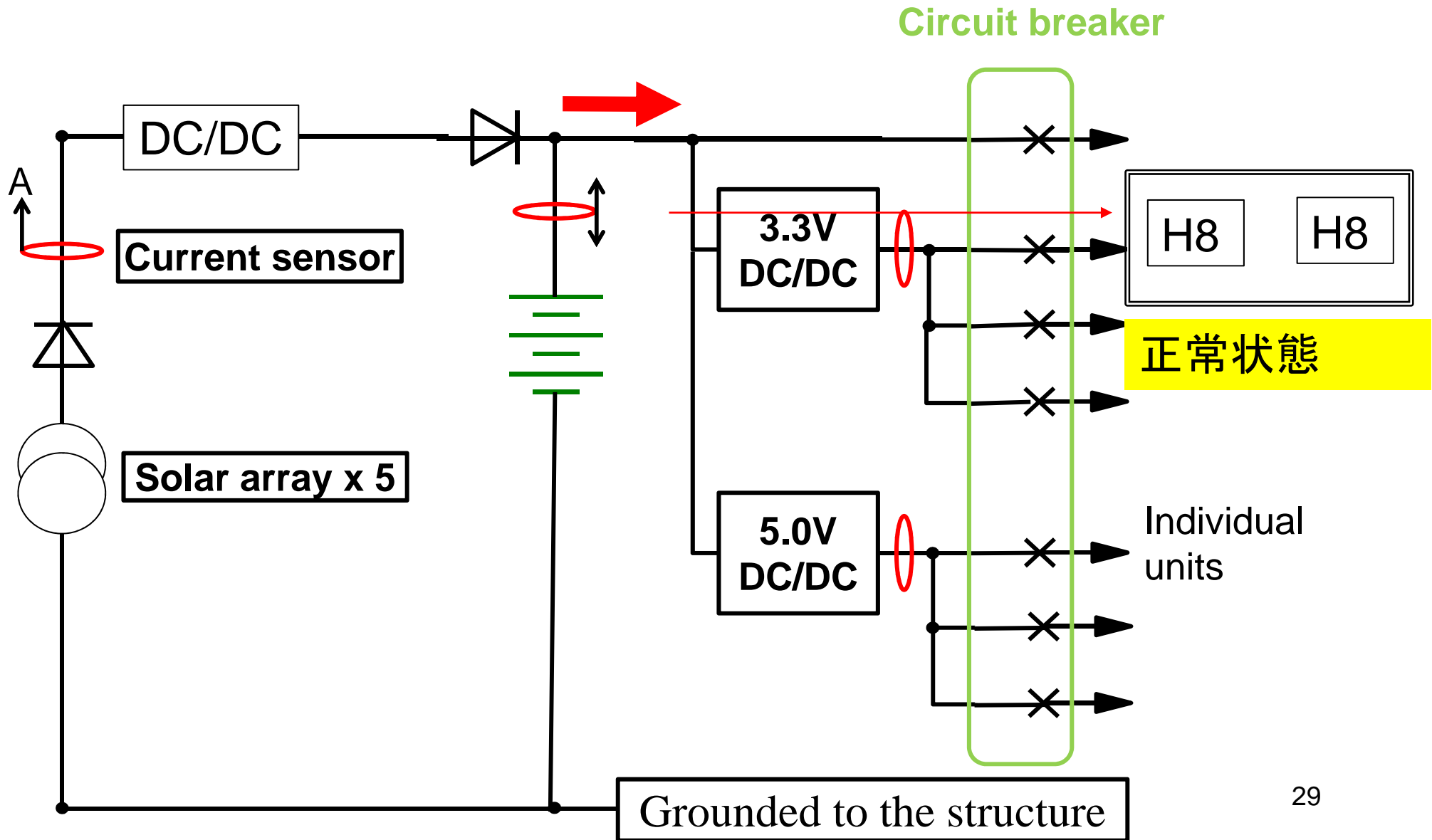




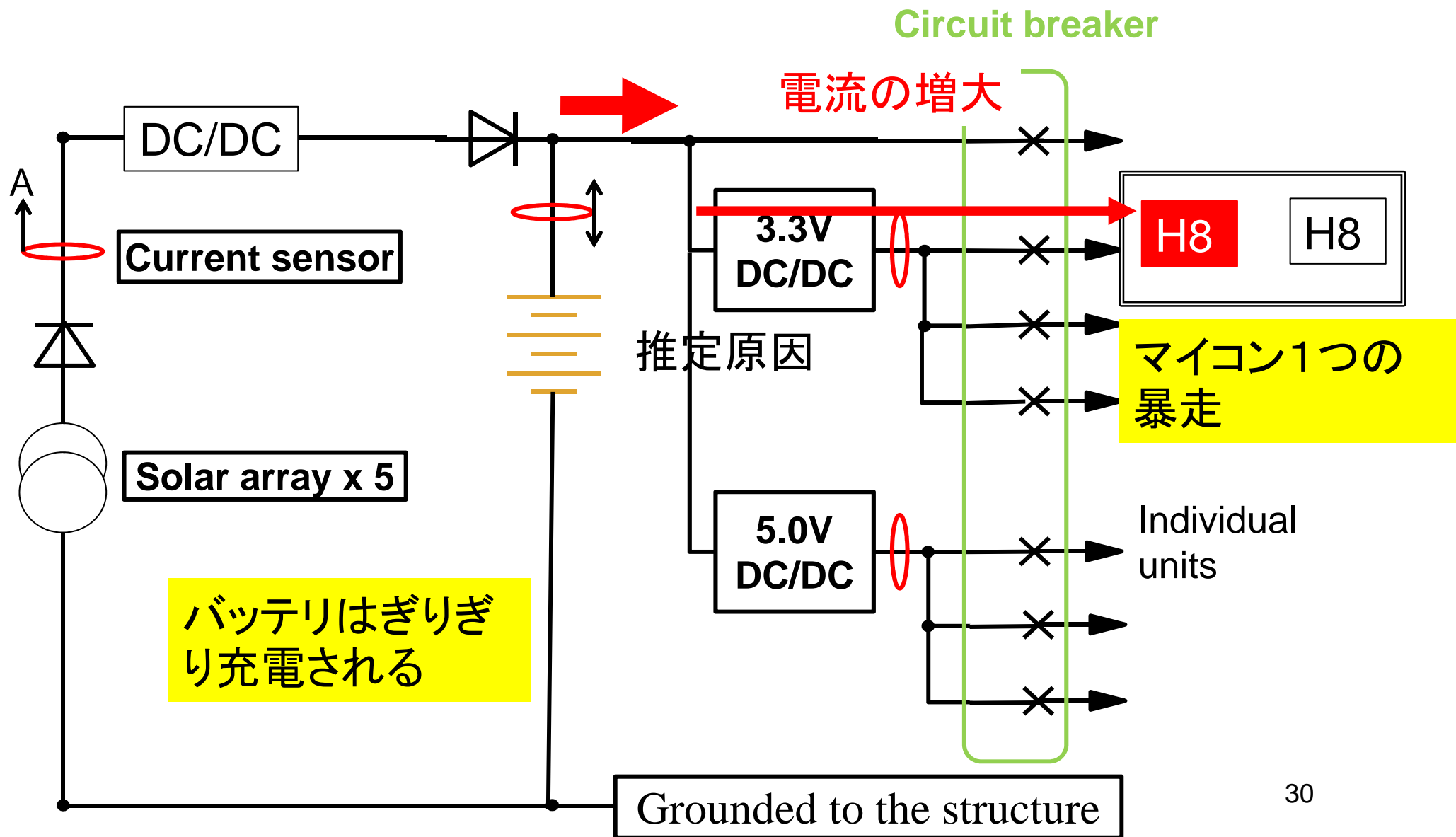
# 復活

- 2012年7月3日02:01
  - HKデータが復活していることを確認
  - HKデータは6月5日以降のデータから更新されていた
- 2012年7月3日12:57
  - 地上からのアップリンクにより、衛星と通信
  - 衛星からの過去ログと詳細センサデータを取得
  - 衛星の機能が正常に戻っていることを確認
  - バッテリー容量が非常に低下していた

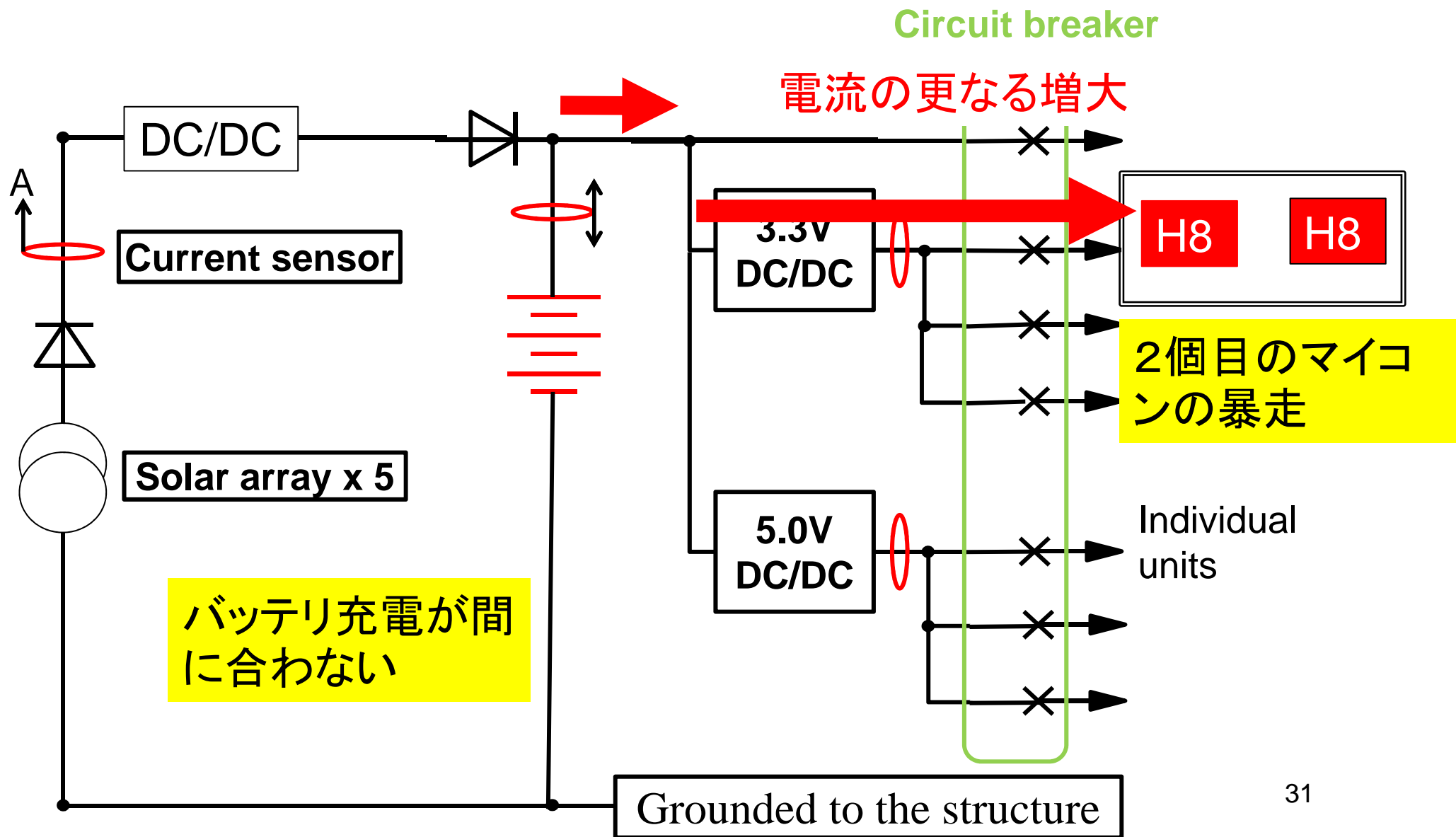
# 推定原因



# 推定原因

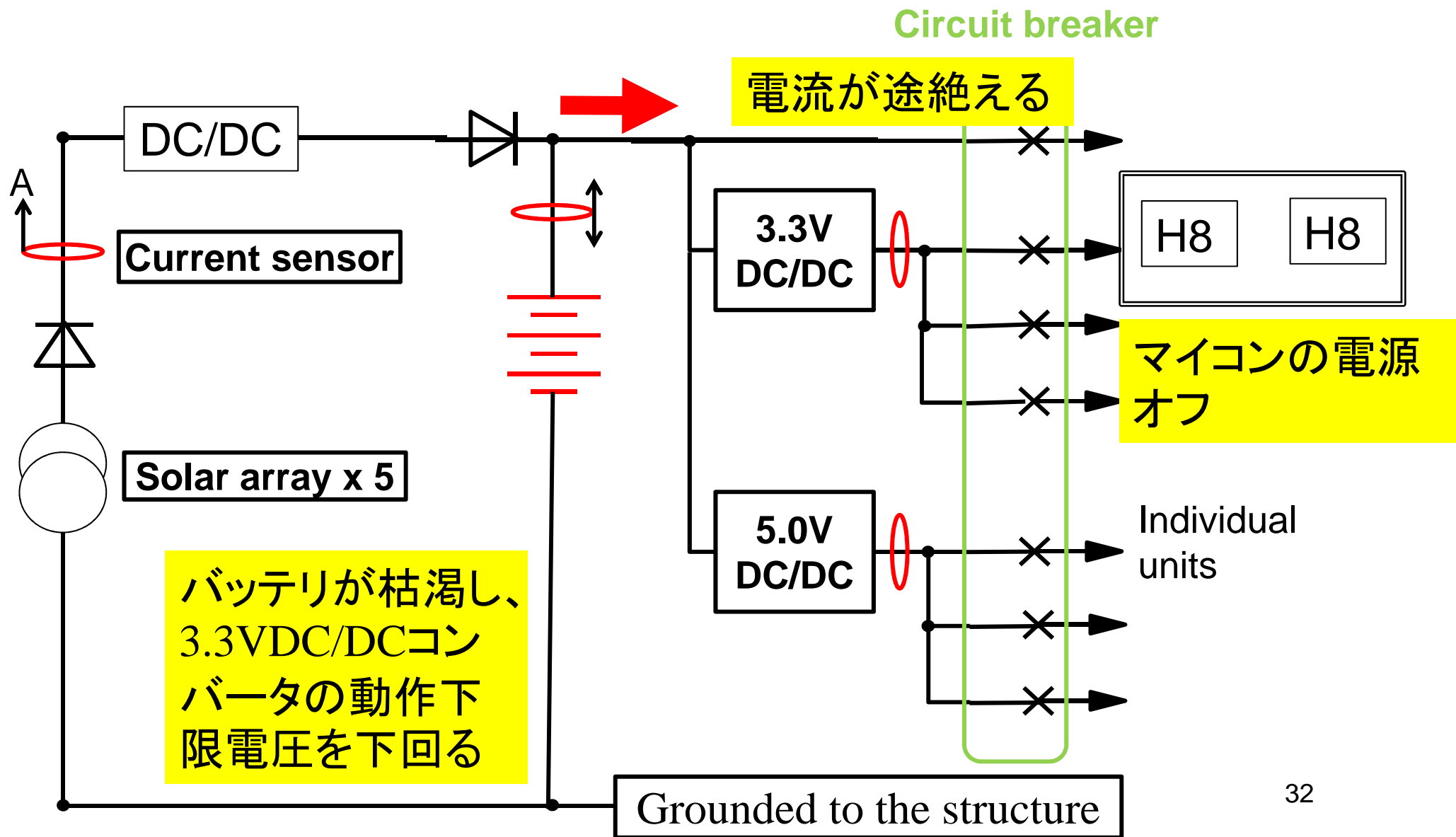


# 推定原因



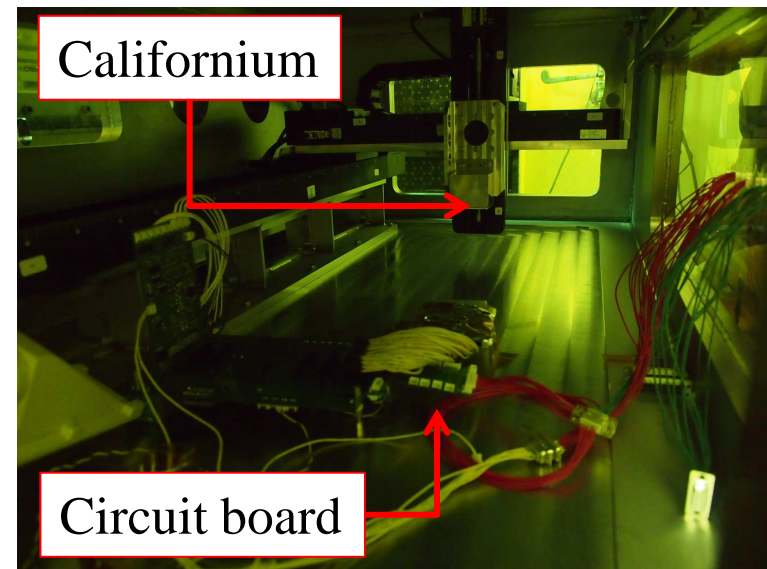
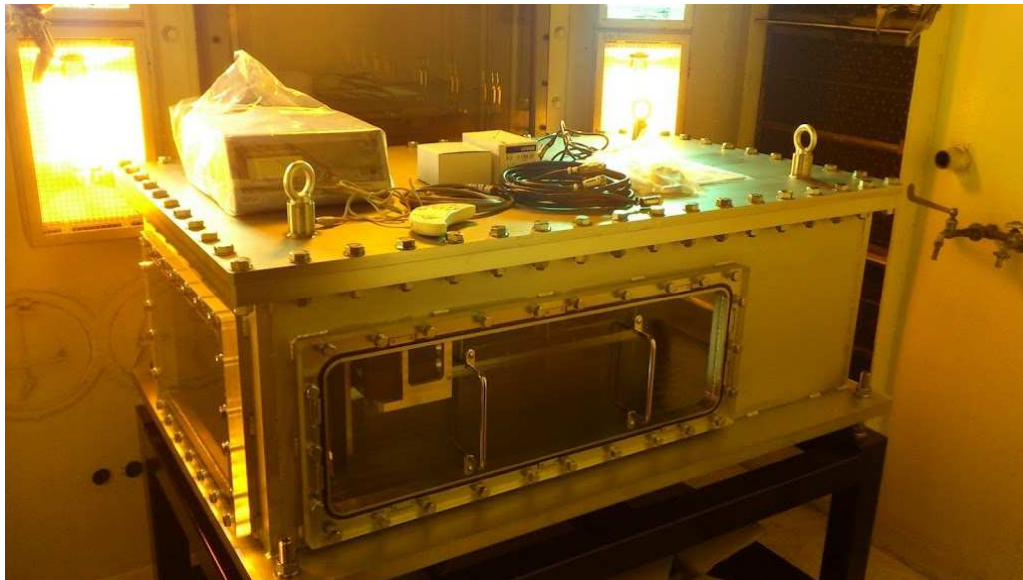


# Possible cause



# シングルイベント試験

- 予備基板のセット（OBC+通信+電源+通信機）を使用
  - シングルイベントが起きるか？
  - シングルイベントが発生しても、リセットかかるか？
  - ラッチアップが起きると、どれくらいの電流が流れるか？

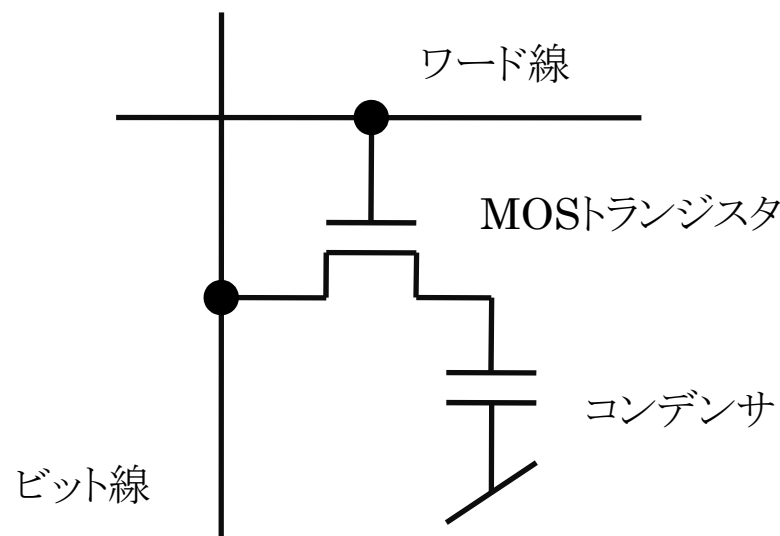
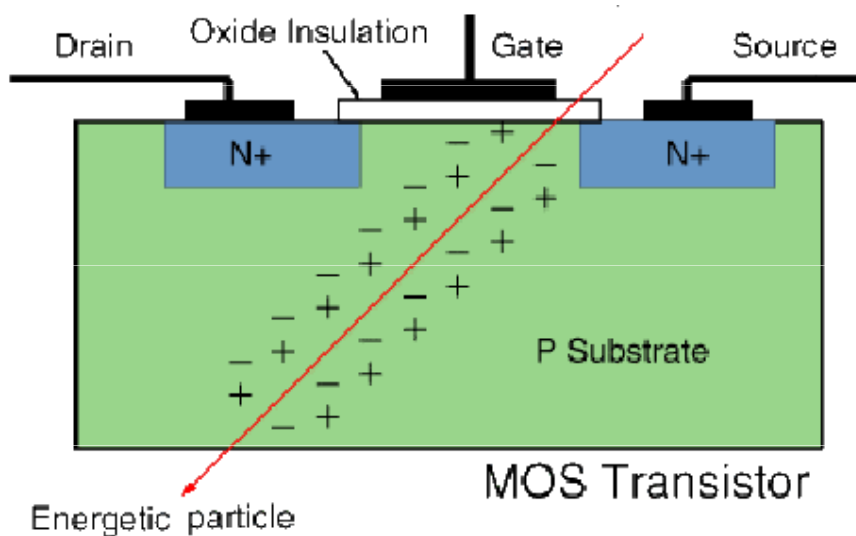


京都大学原子炉実験所のカリフォニウム照射試験装置

# シングルイベント

- シングルイベントアップセット

- 電離によって発生した電荷がメモリ中の0と1を反転させる
  - コンデンサ中の電荷が変化する



[http://web.mac.com/tus\\_goodjob/science\\_goodjob/dijital\\_MOS\\_ichiran\\_files/MOStoranzista.ppt](http://web.mac.com/tus_goodjob/science_goodjob/dijital_MOS_ichiran_files/MOStoranzista.ppt)

[http://www.tsl.uu.se/radiation\\_testing/tsl\\_see.html](http://www.tsl.uu.se/radiation_testing/tsl_see.html)

ソフトエラー(リセット可能)

DRAM composition

34

# シングルイベント

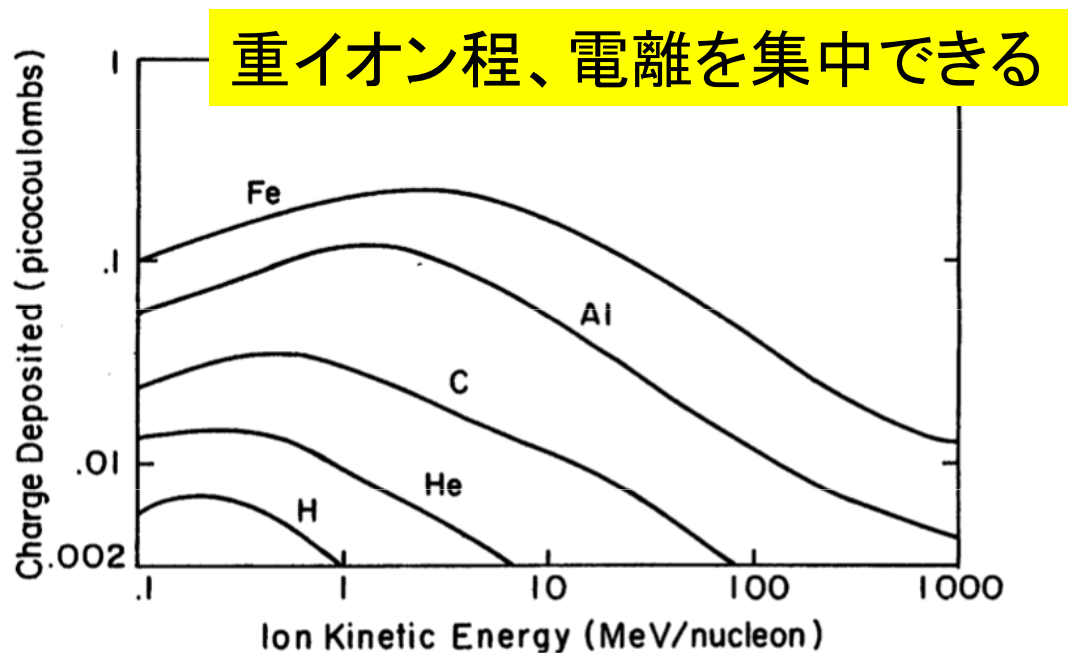


Figure 6.14. Charge Deposited in 1  $\mu\text{m}$ . (Robinson, 1988).

From *Spacecraft Environment Interaction*, Hastings and Garrett, Cambridge University Press

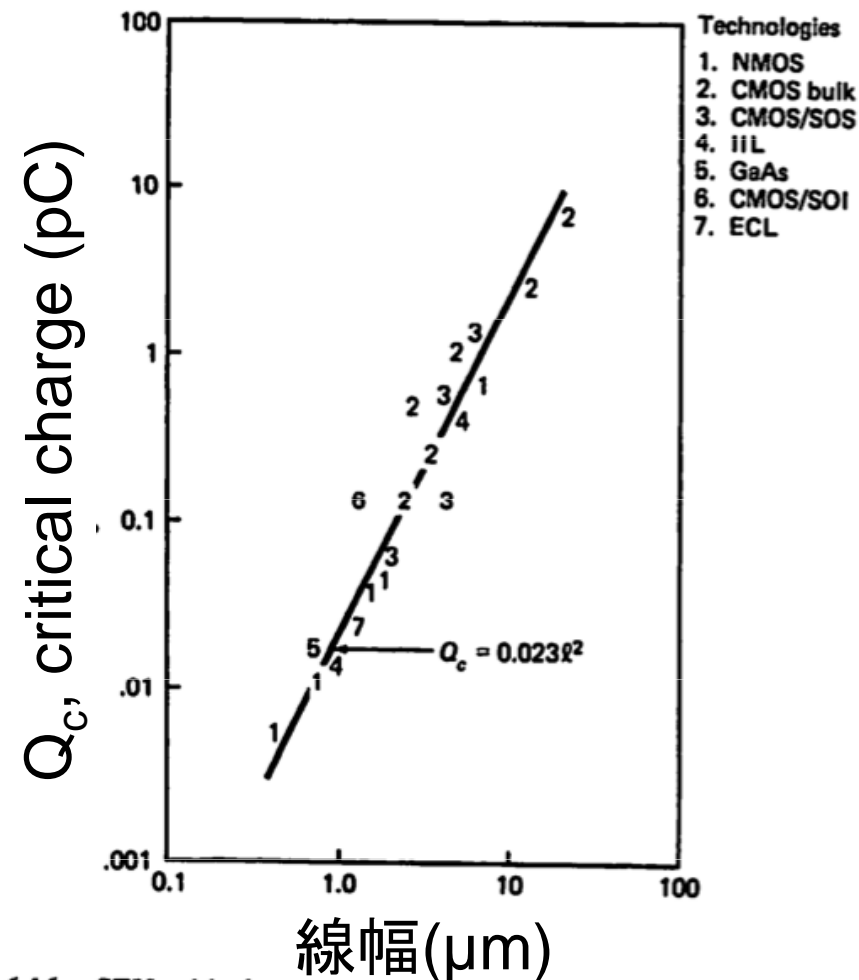
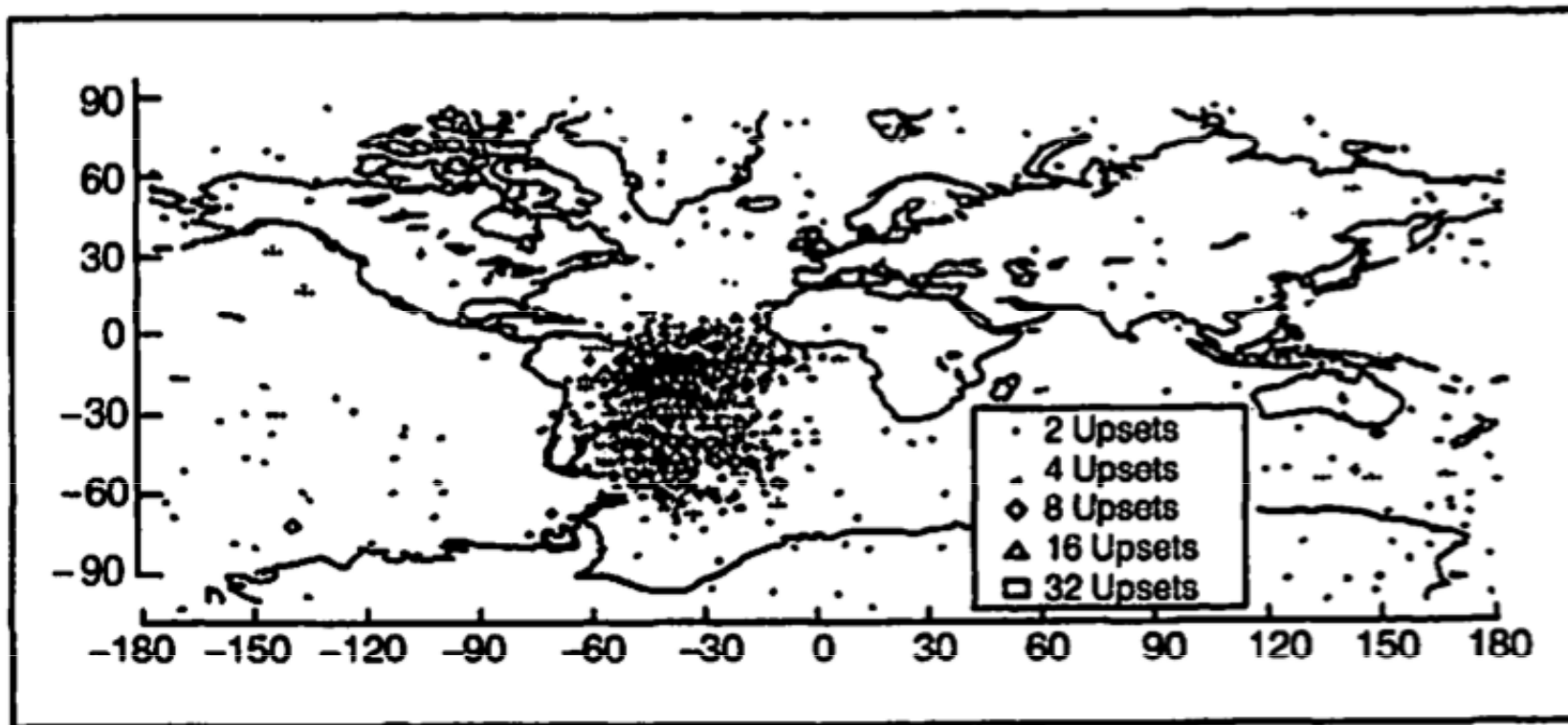


Figure 6.16. SEU critical charge versus scale size. From Ref. 24.

From *Single Event Phenomena*, Messenger & Ash, Chapman & Hall

Memory反転のための電荷量0.01~1pC

# シングルイベント

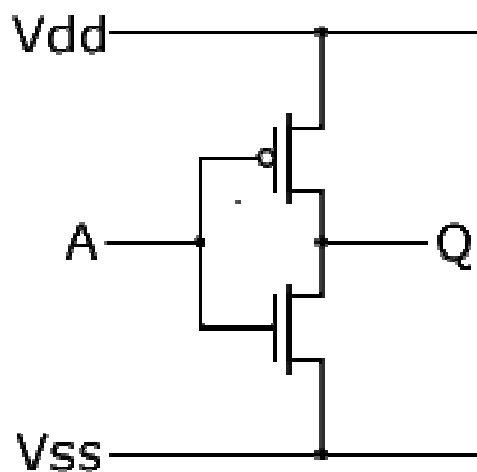


**Figure 6.21'.** South Atlantic Anomaly SEUs on board solar magnetosphere explorer (SAMPEX) nearly polar low-altitude spacecraft between Sept. 5, 1992 and Dec. 1, 1992. From Ref. 26. *From Single Event Phenomena, Messenger & Ash, Chapman & Hall*

低軌道では、放射線帯の陽子による南大西洋異常域上空でのシングルイベントが支配的

# シングルイベントラッチアップ(SEL)

- CMOS
  - Connecting two MOS



<http://ja.wikipedia.org/wiki/CMOS>

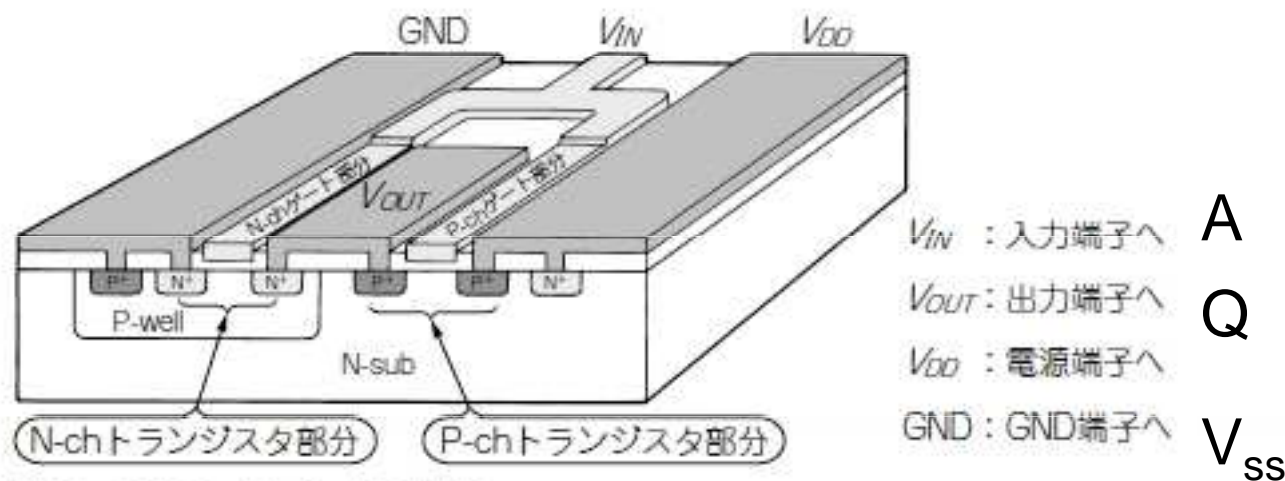


図2.6 CMOSインバータの構造

[http://www.cqpub.co.jp/hanbai/books/30/30261/30261\\_2syo.pdf](http://www.cqpub.co.jp/hanbai/books/30/30261/30261_2syo.pdf)

# CMOS

- 通常のCMOSはpnpn接合の寄生サイリスタを形成

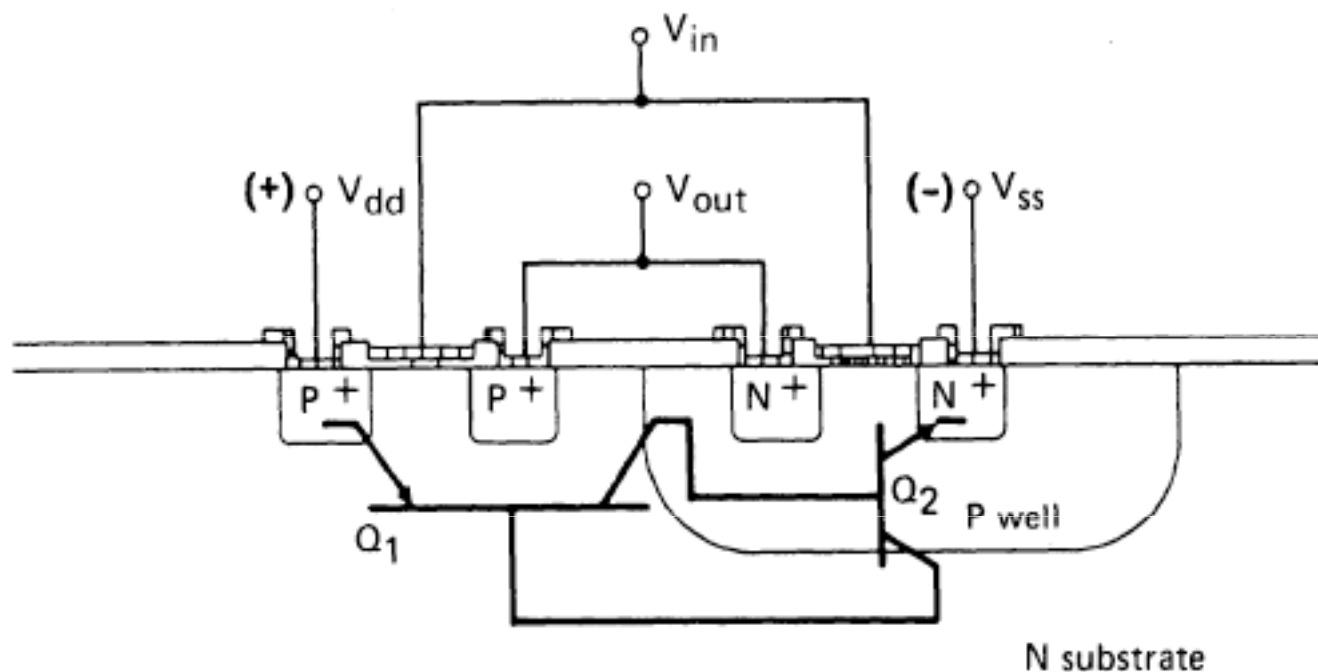


Figure 2. CMOS inverter with parasitic transistors.

# シングルイベントラッチアップ(SEL)



ラッチアップ電流

粒子軌跡

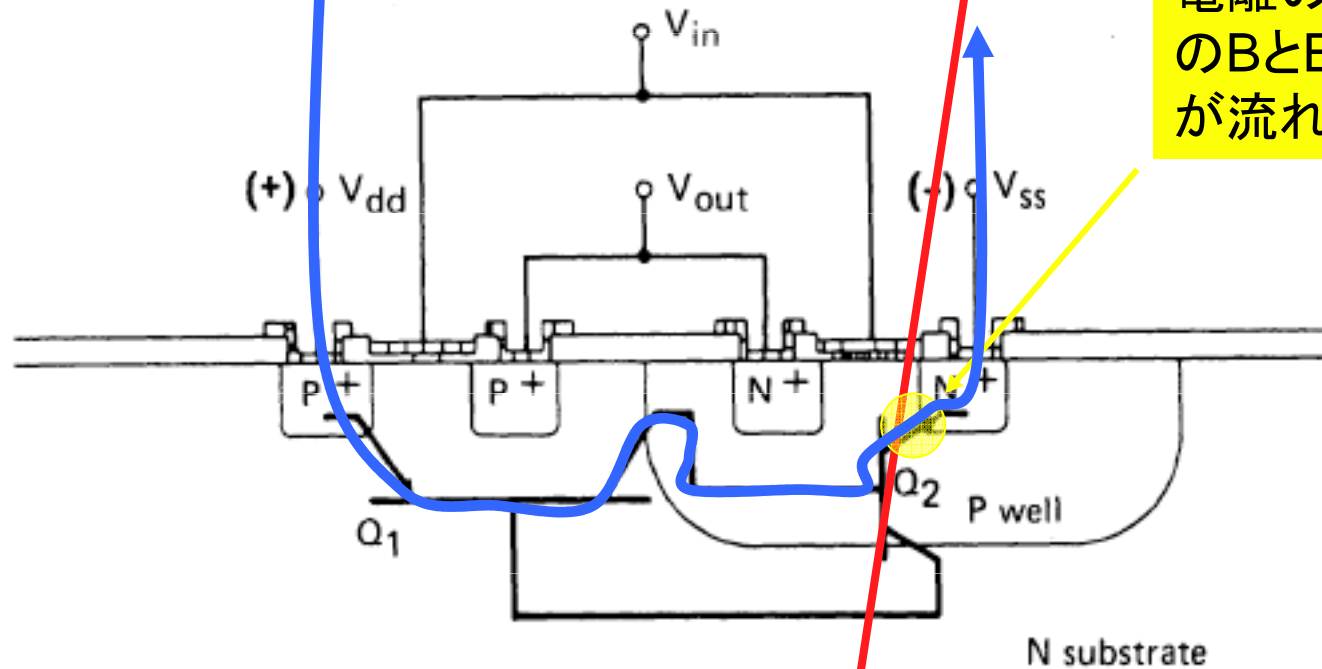


Figure 2. CMOS inverter with parasitic transistors.

M. Shoga and D. Binder, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-33, No. 6, December 1986

電流がVddからVssに自発的に流れ、Vddをゼロにしない限り流れ続ける



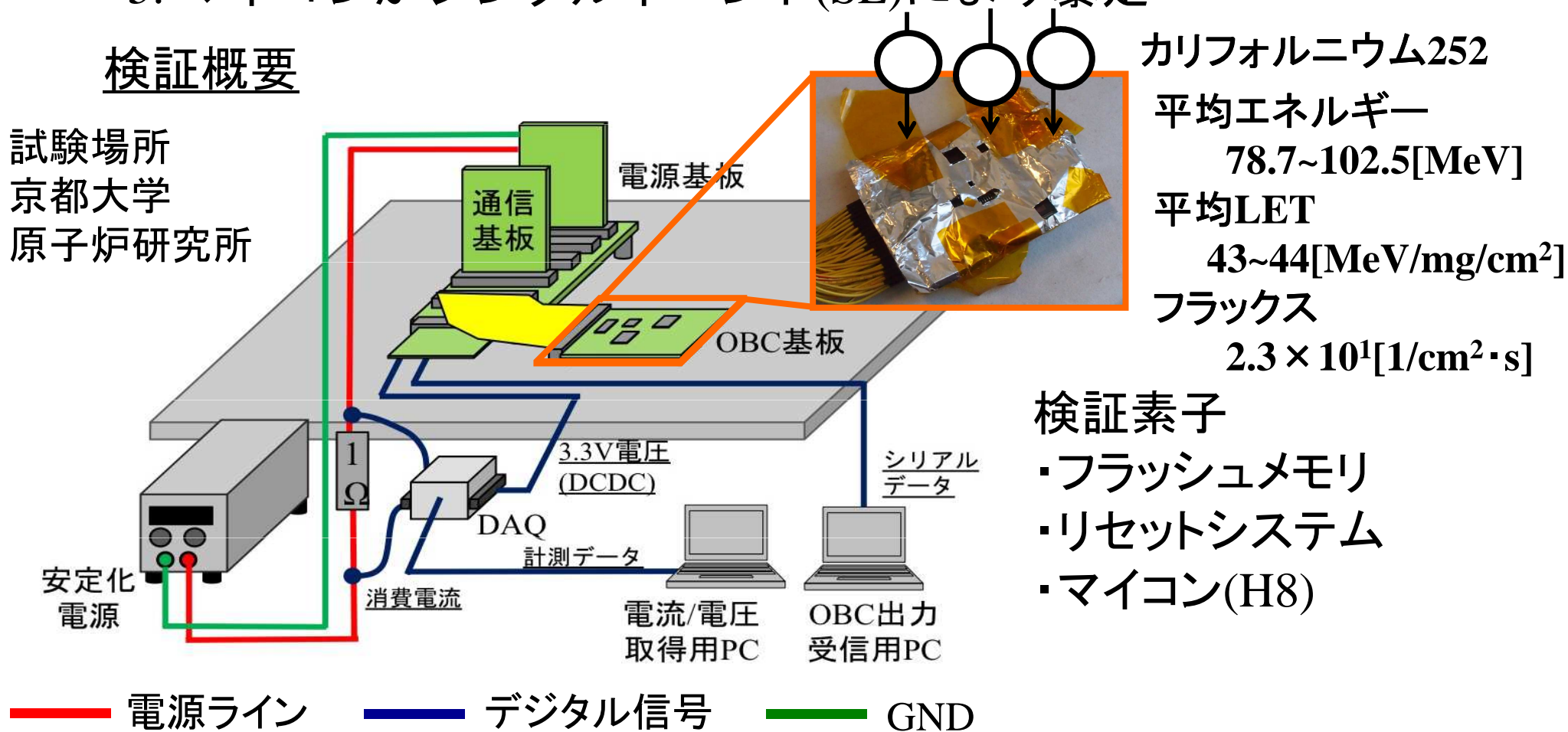
# SE試験構成

## 検証項目

### 5. マイコンがシングルイベント(SE)により暴走

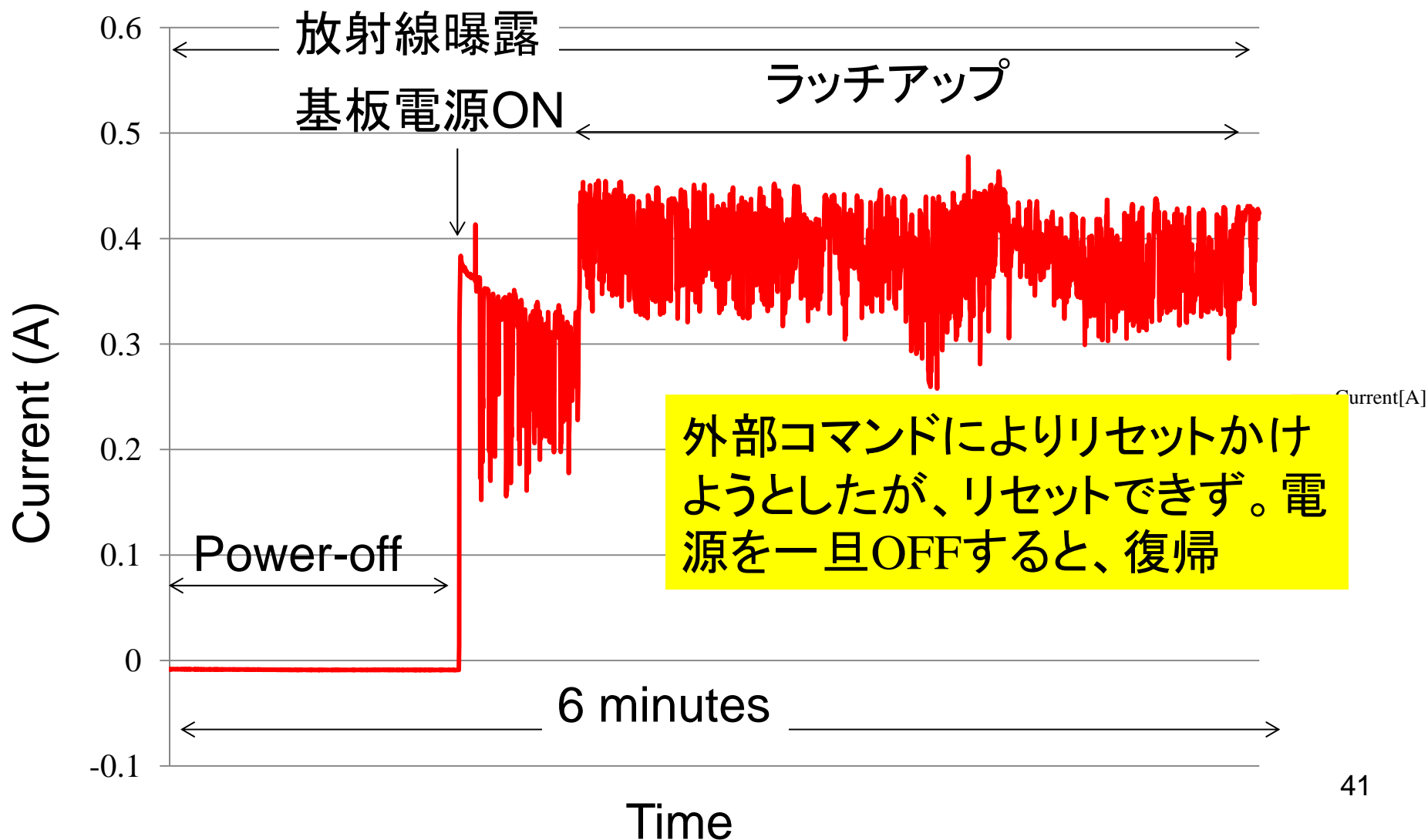
## 検証概要

試験場所  
京都大学  
原子炉研究所



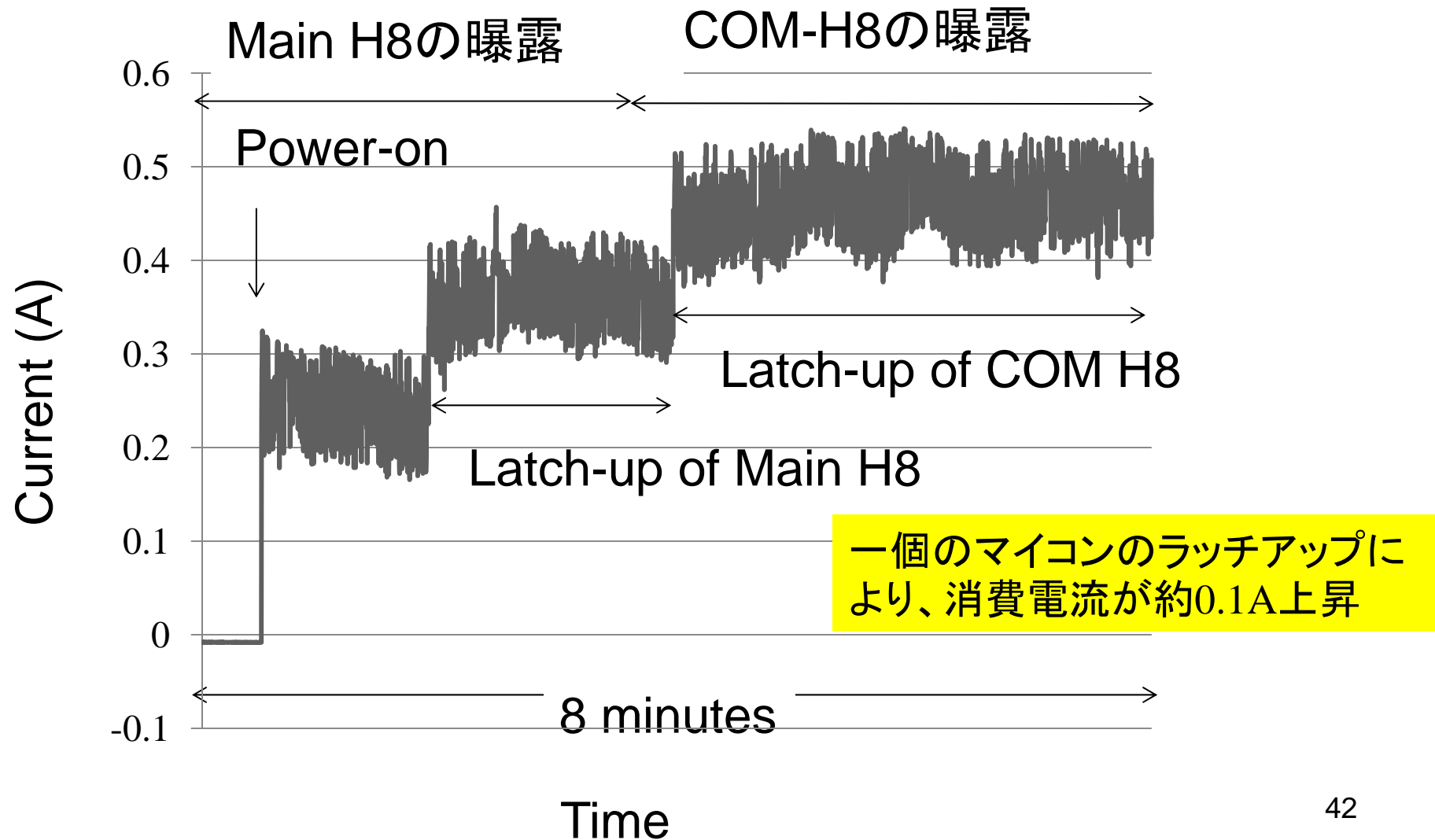
# Single Event Test

マイコン一個のラッチアップ



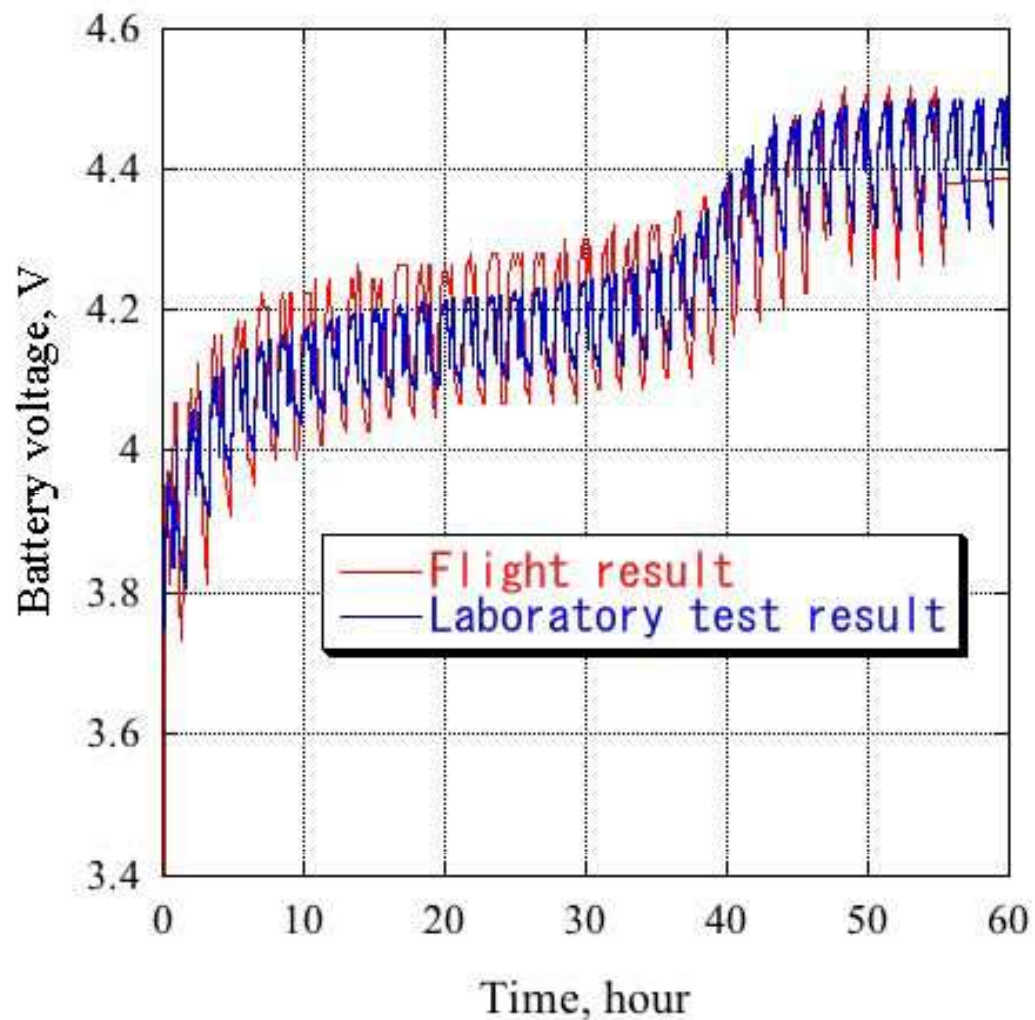
# Single Event Test

## マイコン2個のラッチアップ



# 復活後

- 復活後、約 2 日で衛星は通常状態に復帰
  - ほぼ、地上試験結果通りにバッテリーが枯渇状態から復帰

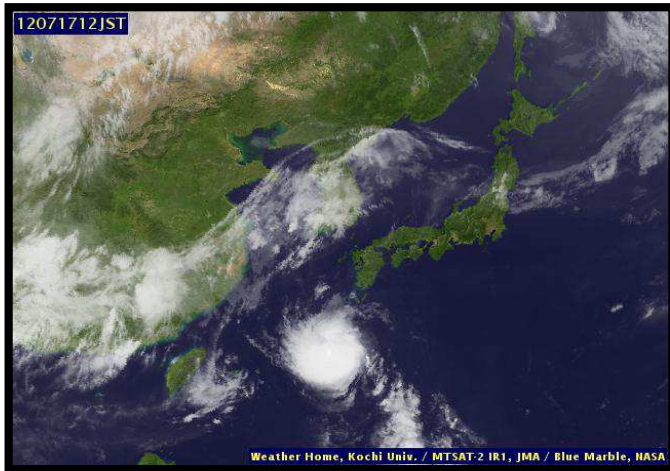




# 不具合原因究明の結果

- 熱サイクル → ×
  - 熱サイクル試験で確認
- 内部帯電 → △
  - 帯電による放電は確認したが、深刻な被害なし
  - 帯電電位と放電回数を見積もる必要あり
- 外部からの異物による短絡 → ×
  - 衛星は復活した
- リセット素子が放射線の影響をうけて故障 → ×
  - シングルイベント試験で確認
- マイコンがシングルイベント(SE)により暴走 → ○
  - シングルイベント試験で現象を再現
- その他

# 復活後

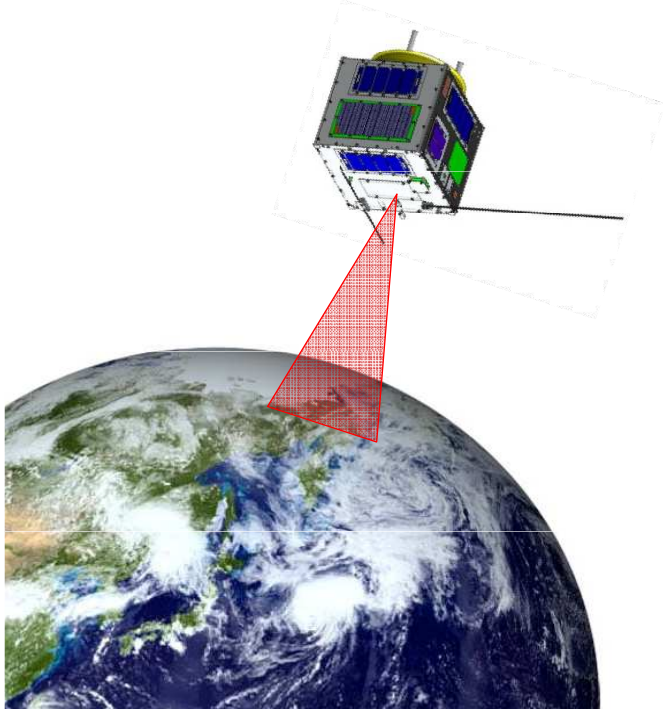


ひまわりが捉えた台風7号



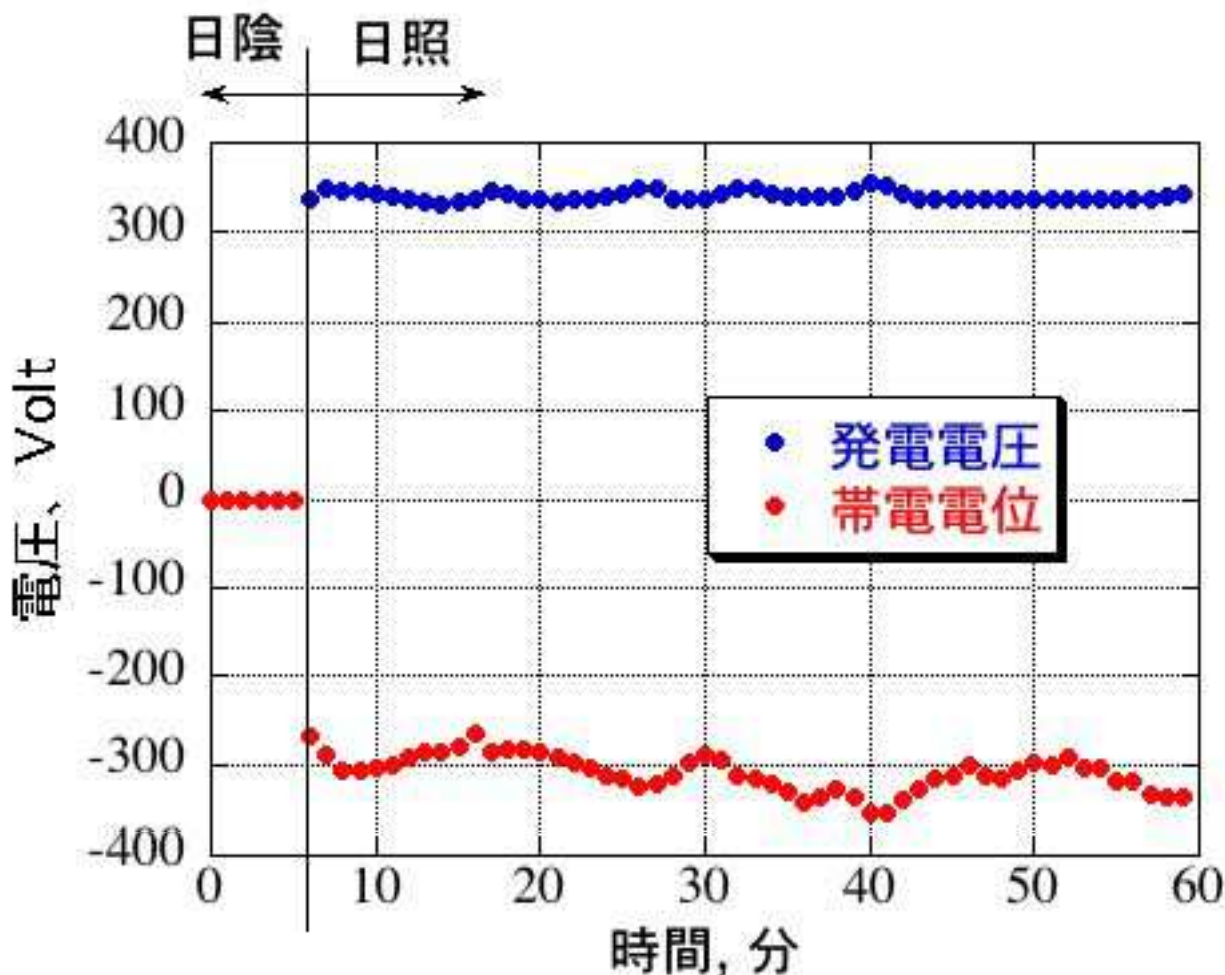
鳳龍弐号が捉えた台風7号

鳳龍弐号が捉えた日本列島



# 復活後

## 300V発電実験



### 朝日新聞 科学

現在位置: 朝日新聞デジタル > 科学 > 記事 2012年7月11日7時49分

393 ブログに利用 BI 17 +1 13 おすすめ 217

#### 九工大生の衛星が快挙 宇宙の太陽電池発電で世界最高値



人工衛星「鳳龍式号」=九州工業大提供

九州工業大（北九州市戸畑区）は10日、学生らが製作し、5月にH2Aロケットで打ち上げた小型人工衛星が、表面の太陽電池で350ボルトの発電に成功したと発表した。宇宙の太陽電池発電では世界最高値という。

衛星は1辺が約30センチの「鳳龍式号（ほうりゅうごう）」。九工大によると、高度680キロの軌道上で8日に実験した際のデータを解析し、330～350ボルトの電圧で30分間安定して発電していることが確認された。これまで宇宙での太陽電池発電は160ボルトが最高だった。九工大は今回の実験結果を「世界初の快挙だ」としている。

[PR]



鳳龍式号は、九工大戸畑キャンパスの工学系の大学院生や学部生ら35人ほどが約2年間かけて設計から製作まで手がけた。5月に、鹿児島県の種子島宇宙センターから打ち上げたH2Aロケットで宇宙に運んだ。

2012.7.11朝日新聞

宇宙空間での発電電圧の世界新記録を達成



# 現在の状況

- 12/2 12:23 コールサインの後にデータが来ない
  - COM-H8 に不具合
  - ラッチアップが再度発生
- ラッチアップ発生までの時間
  - 5/18 打上げ
  - 6/5 Main-H8 18日
  - 6/30 COM-H8 44日
  - 7/3 復活
  - 12/2 COM-H8 復活から152日
  - 過去3回のシングルイベント発生までの平均日数 = 71日
  - Main-H8 復活後 238日経過





# 不具合からのLessons Learned

- 放射線の影響を過小評価してはいけない
- 少なくとも、バス基板レベルでのシングルイベント試験を行なって、SE発生時のバス系の挙動を把握し、耐放射線設計（過電流保護回路、リセット、スポットシールド等）の有効性を検証すべき
- 不具合発生時に対応できる様々なサバイバルモードを用意し、実際に検証しておくことが大事
  - ビーコン+最低限のHKの確保
  - バッテリゼロからの復活
  - セーフモード？
- 薄板一枚で覆われる超小型衛星では内部基板が帯電する可能性あり