

## 第14回宇宙天気ユーザーズフォーラム

# 宇宙機の帯電放電

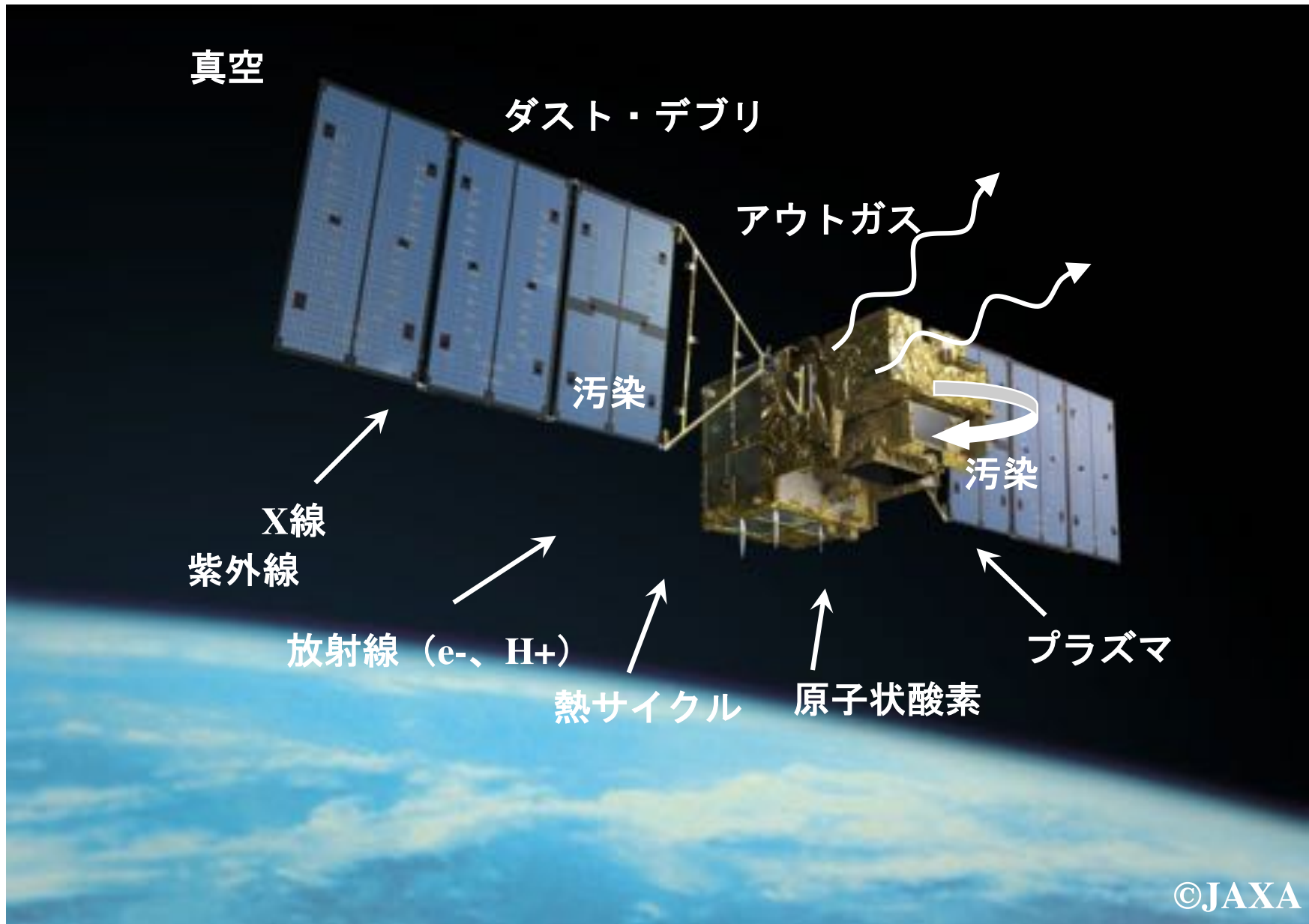
九州工業大学 宇宙システム工学研究系

宇宙環境技術ラボラトリー

豊田和弘

参考書：Daniel Hastings and Henry Garrett,  
“Spacecraft-Environment Interactions”

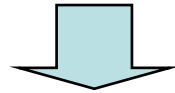
# 宇宙



# 放電事故

1997年 静止軌道衛星Tempo-2

発電電力の15%が低下



世界中の研究機関が調査を開始

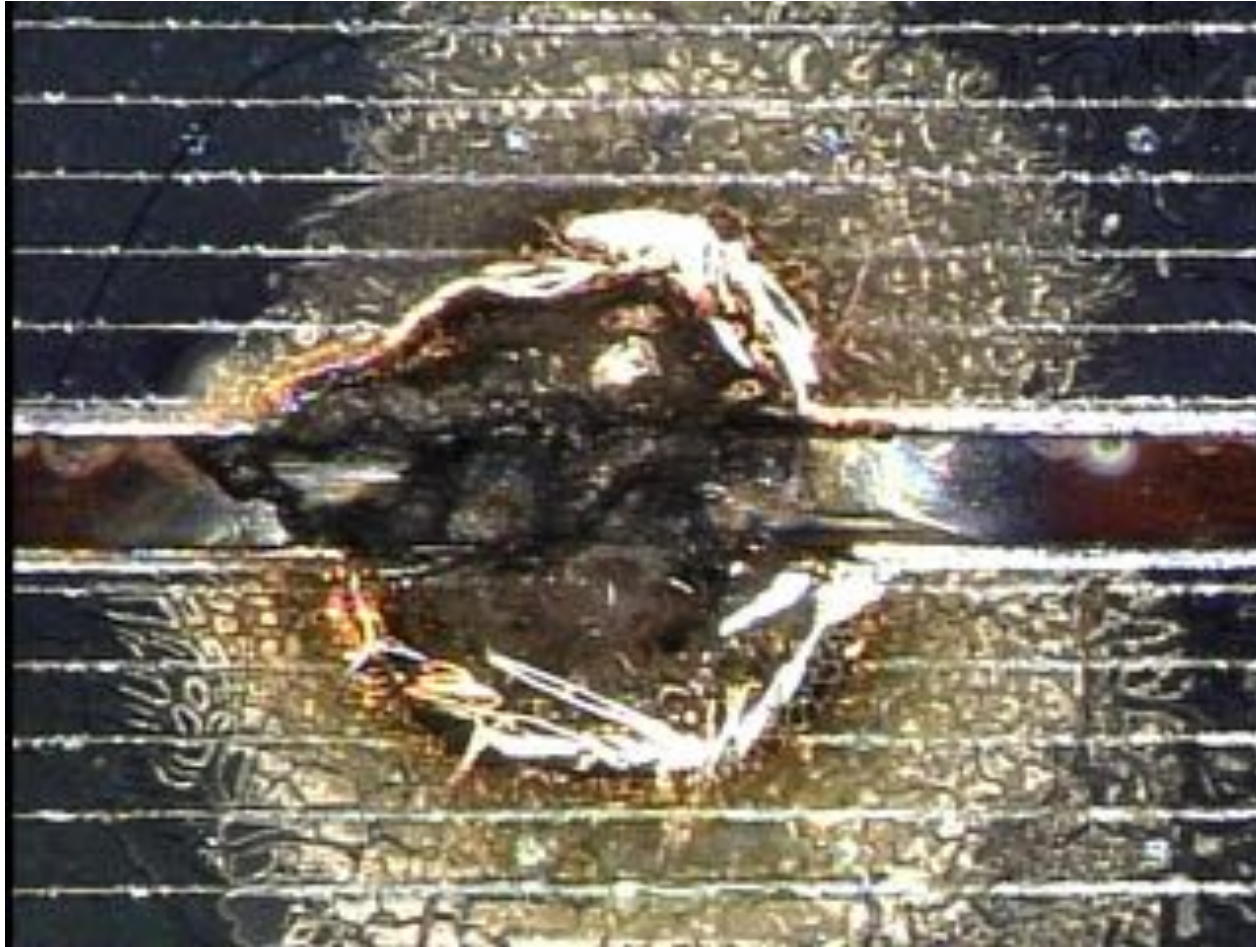
Tempo-2



太陽電池アレイと宇宙プラズマとの  
相互作用により放電が発生

**アレイ回路の短絡** → 電力損失

# 持續放電



# 放電事故

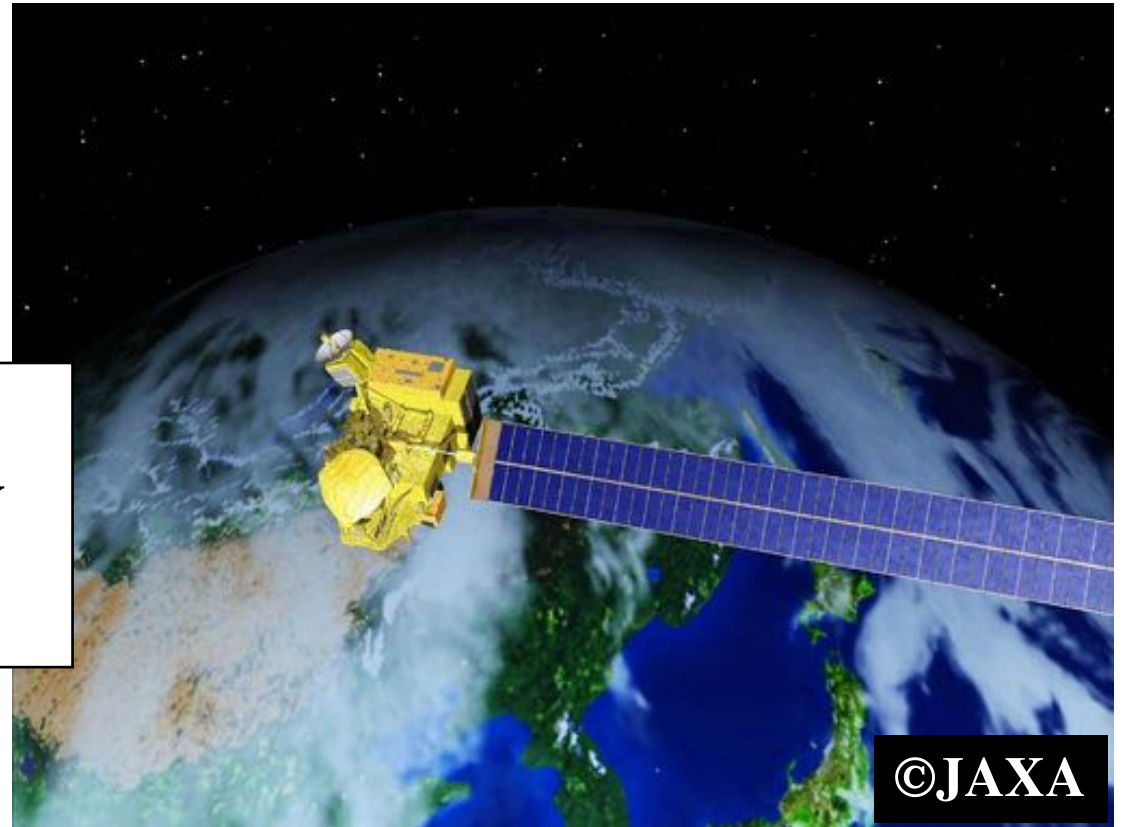
- みどり2号  
極軌道衛星

2003年10月  
発電電力が6kWから1kW  
に低下

熱制御材の帯電



ケーブルと放電



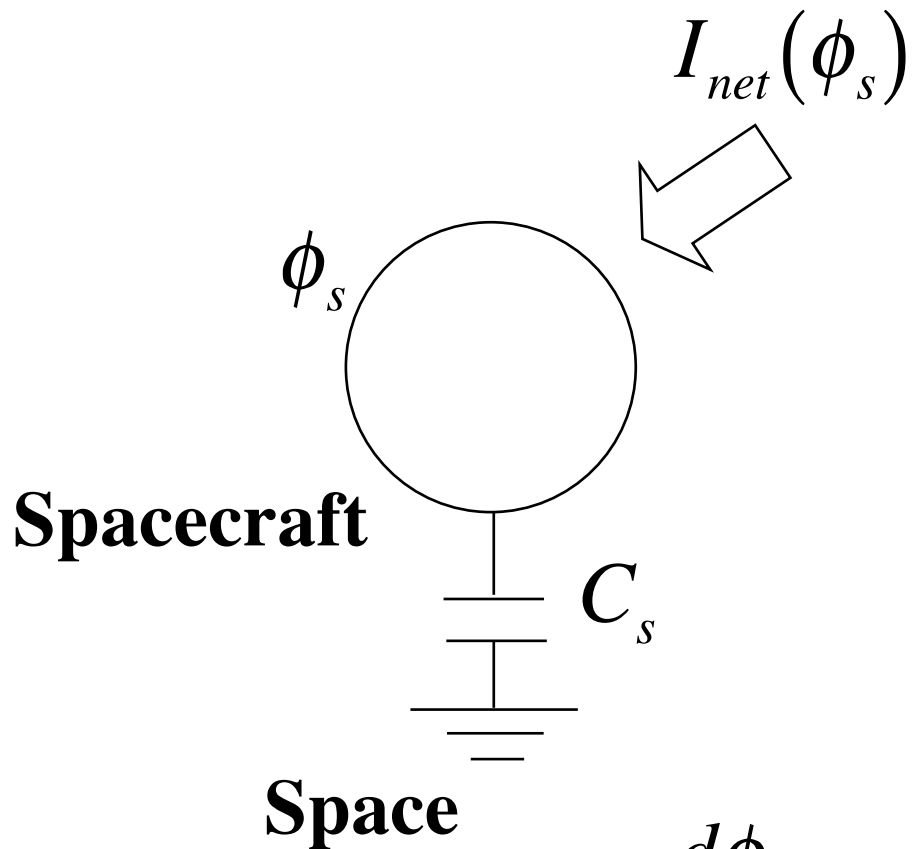
# 帯電

- **表面帯電**
  - 導体や絶縁体表面に電荷がたまる
- **内部帯電**
  - 絶縁体内部に電荷がたまる
  - 宇宙機外壁などを通過し電荷がたまる

# 帯電放電

- 宇宙では接地できない
  - 宇宙機は電氣的に浮いている
    - 宇宙プラズマで宇宙機が帯電
- 絶縁体もちろん帯電
  - 宇宙機構体(導体)と絶縁体表面で電位差発生
  - 放電する

# 宇宙機の電位と電流



$$\frac{dQ}{dt} = I_{net}$$

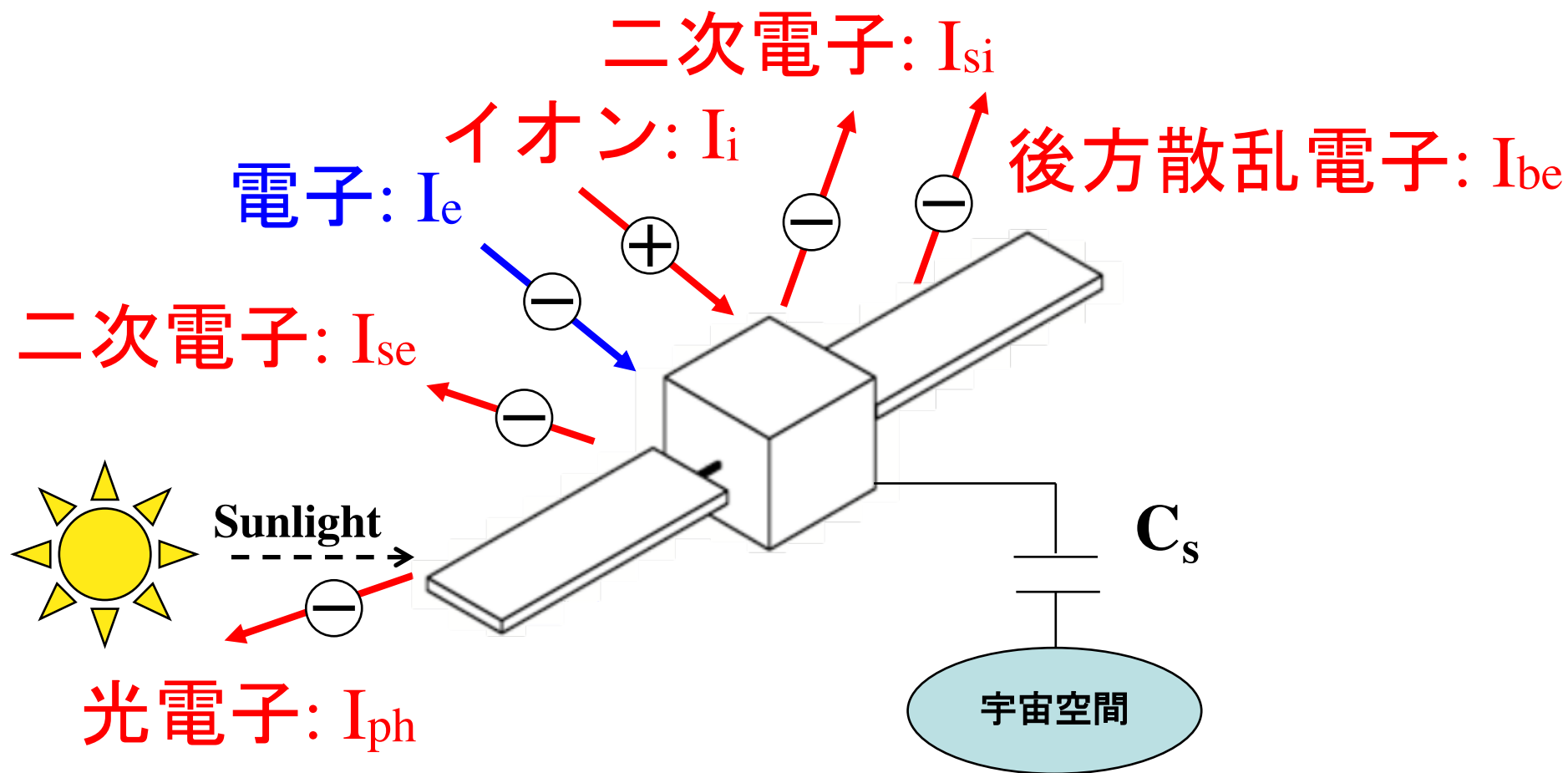
$$Q = C_s \phi_s$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{1}{C_s} I_{net}$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = 0 \quad \text{のとき} \quad I_{net}(\phi_s) = 0$$



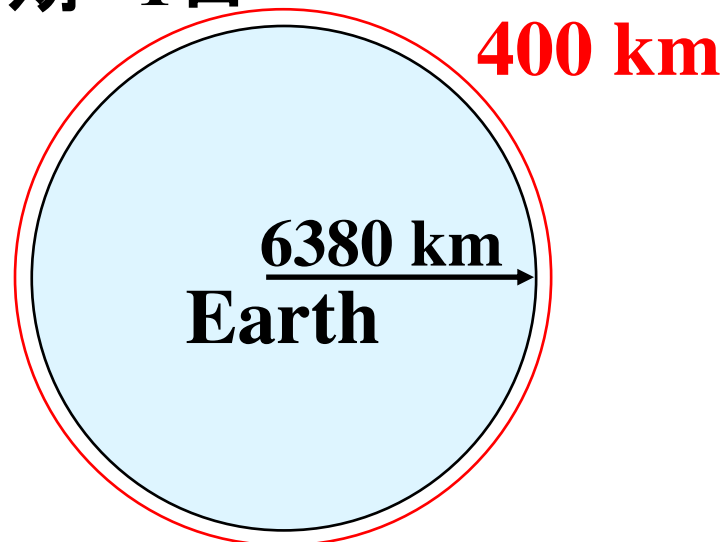
# 宇宙機の流出入電流



$$I_{net} = I_i + I_{se} + I_{si} + I_{be} + I_{ph} - I_e$$

# 人工衛星の軌道

- **低地球軌道 LEO (Low Earth Orbit)**
  - 高度300 km～1500 km
  - 周期 約90分、速度 8 km/s
- **静止軌道 GEO (Geosynchronous Orbit)**
  - 高度36000 km **国際宇宙ステーション(ISS)**
  - 周期 1日



# GEO プラズマ環境

## 数keVから数十keVの荷電粒子

			Electron	Ion
<b>Nominal</b>	<b><math>n_1</math></b>	<b><math>10^6 \text{ m}^{-3}</math></b>	<b><math>0.78 \pm 0.7</math></b>	<b><math>0.19 \pm 0.16</math></b>
	<b><math>T_1</math></b>	<b>keV</b>	<b><math>0.55 \pm 0.32</math></b>	<b><math>0.8 \pm 1.0</math></b>
	<b><math>n_2</math></b>	<b><math>10^6 \text{ m}^{-3}</math></b>	<b><math>0.31 \pm 0.37</math></b>	<b><math>0.39 \pm 0.26</math></b>
	<b><math>T_2</math></b>	<b>keV</b>	<b><math>8.68 \pm 4.0</math></b>	<b><math>15.8 \pm 5.0</math></b>
<b>Worst</b>	<b><math>n_1</math></b>	<b><math>10^6 \text{ m}^{-3}</math></b>	<b>1.00</b>	<b>1.10</b>
	<b><math>T_1</math></b>	<b>keV</b>	<b>0.6</b>	<b>0.4</b>
	<b><math>n_2</math></b>	<b><math>10^6 \text{ m}^{-3}</math></b>	<b>1.40</b>	<b>1.70</b>
	<b><math>T_2</math></b>	<b>keV</b>	<b>25.1</b>	<b>24.7</b>

# 宇宙機電位 GEO

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{1}{C_s} I_{net} = \frac{1}{C_s} (I_i - I_e + I_{se} + I_{be} + I_{ph})$$

$$j_{ph} > j_e > j_i$$

$$10^{-5} \quad 10^{-7} \sim 10^{-6} \quad 10^{-8} \sim 10^{-7} \quad \text{A/m}^2$$

日照あり  $I_{ph}$  大  $I_{net} > 0 \Rightarrow \phi_s > 0$

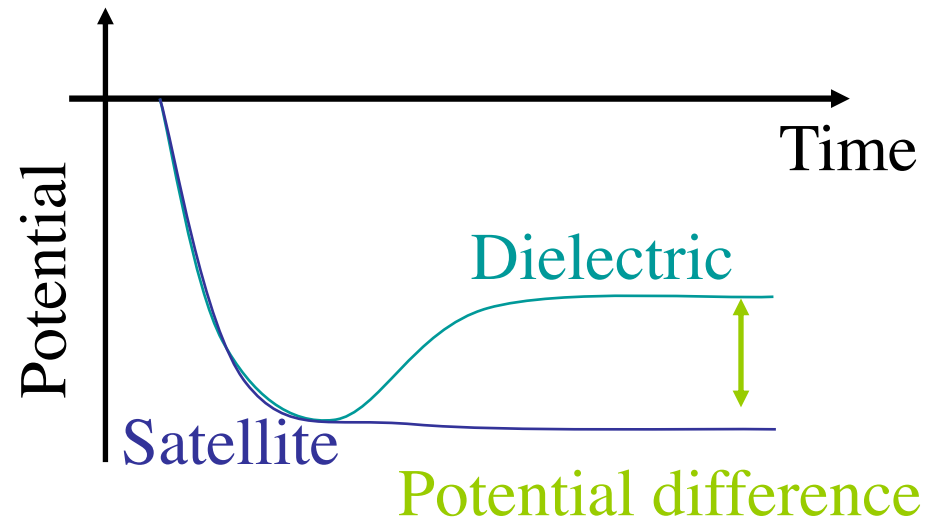
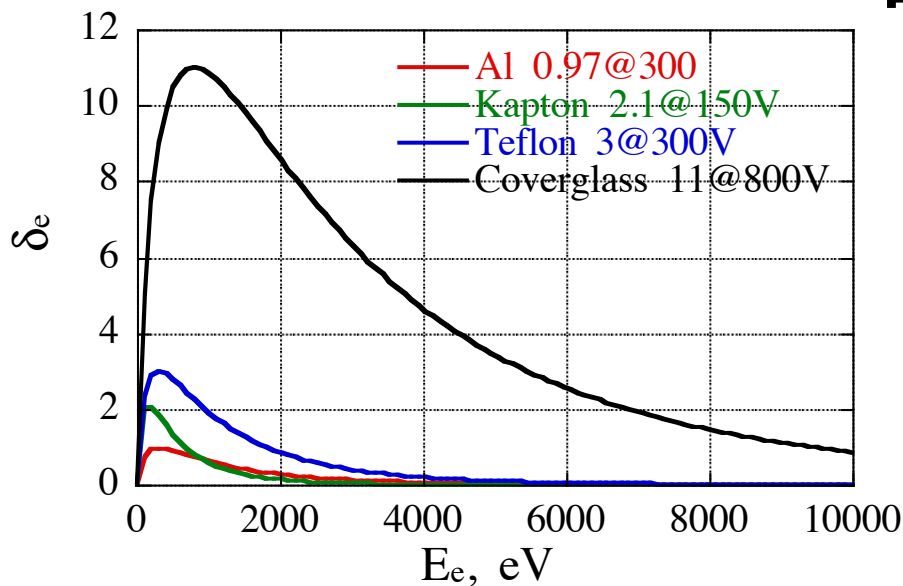
日照なし  $I_e$  大  $I_{net} < 0 \Rightarrow \phi_s < 0$

# 絶縁体表面の電位 GEO

$$\frac{d(\phi_d - \phi_s)}{dt} = \frac{1}{C_d} (j_i - j_e + j_{se} + j_{be} + j_{ph}) - \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} (\phi_d - \phi_s)$$

日陰  $j_{ph} = 0$      $\phi_s < 0$

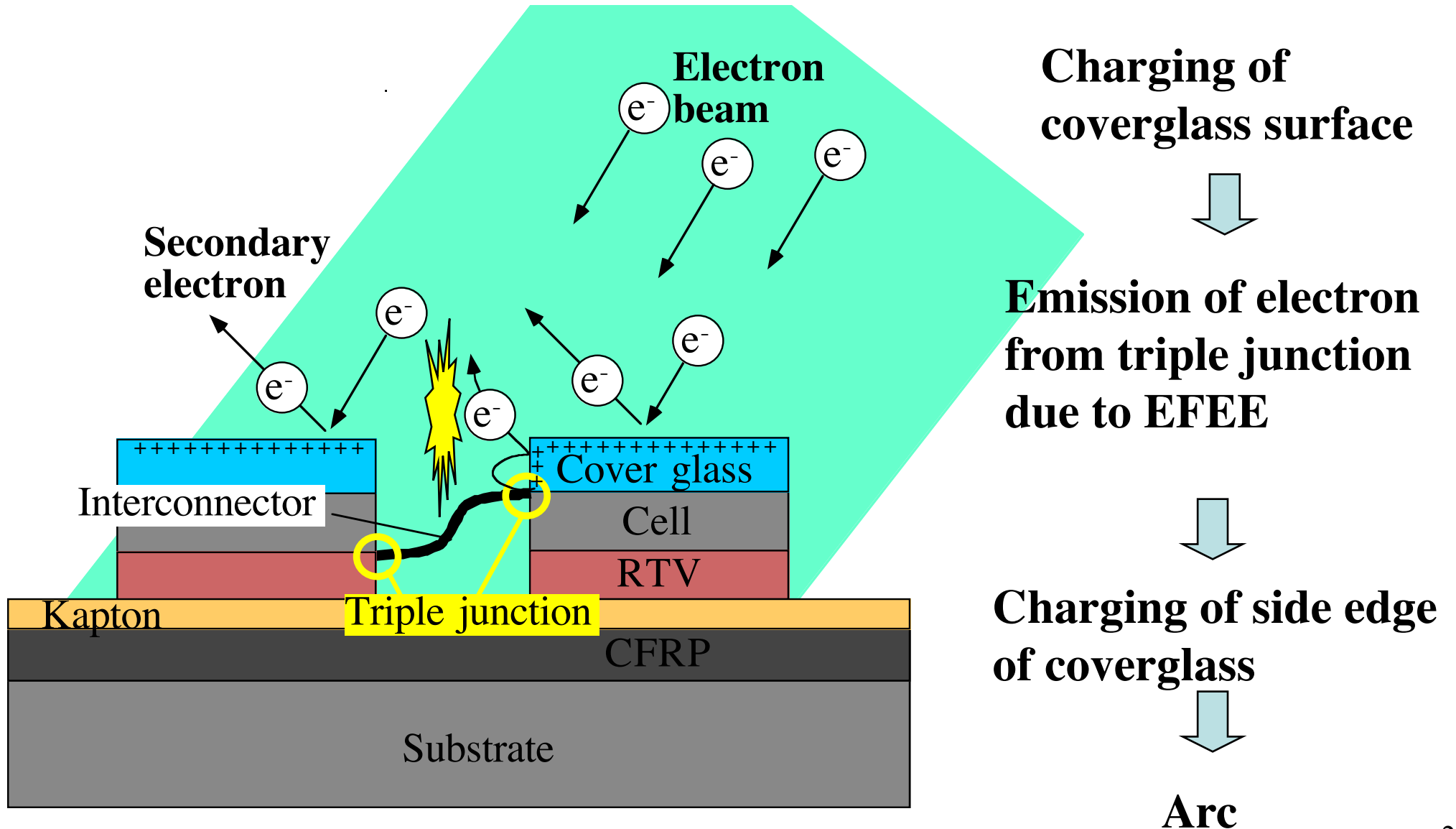
$j_{se} > j_e$  の時  $\frac{d(\phi_d - \phi_s)}{dt} > 0$



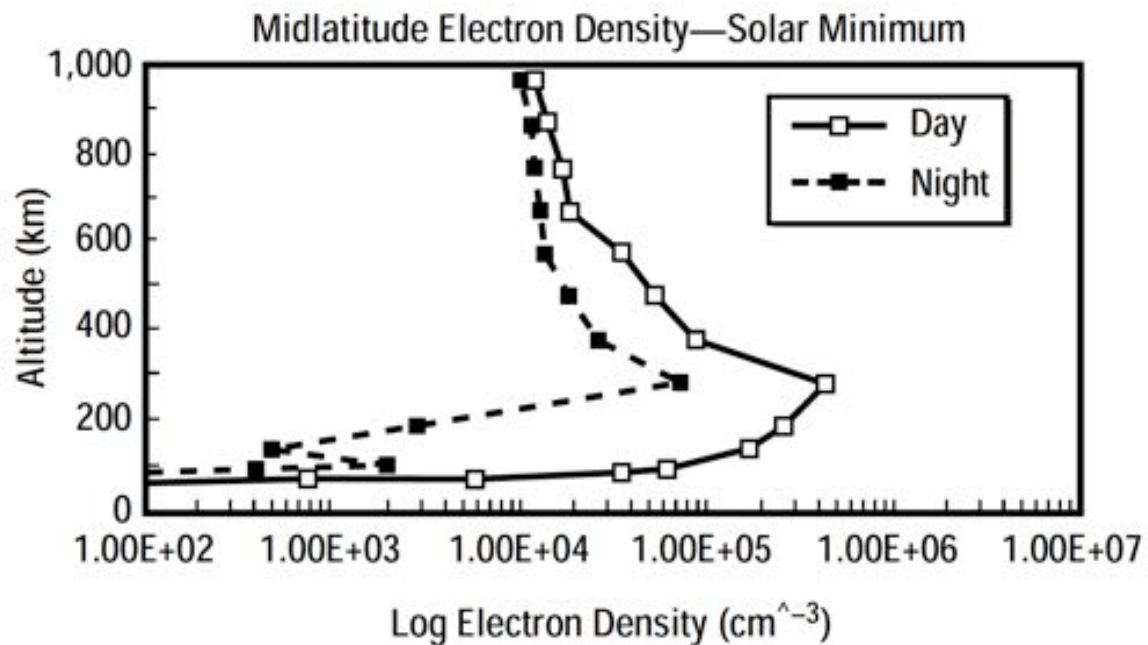
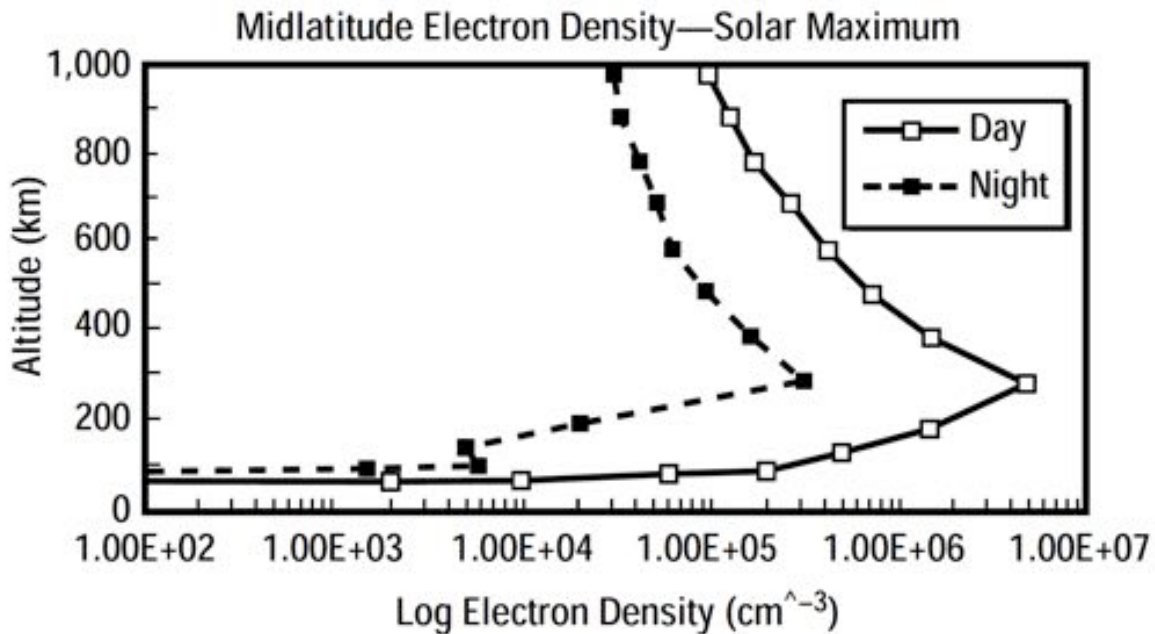
逆電位勾配

Inverted potential gradient

# Mechanism of arcing



# LEOプラズマ環境



プラズマ密度

$10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^{-3}$

温度

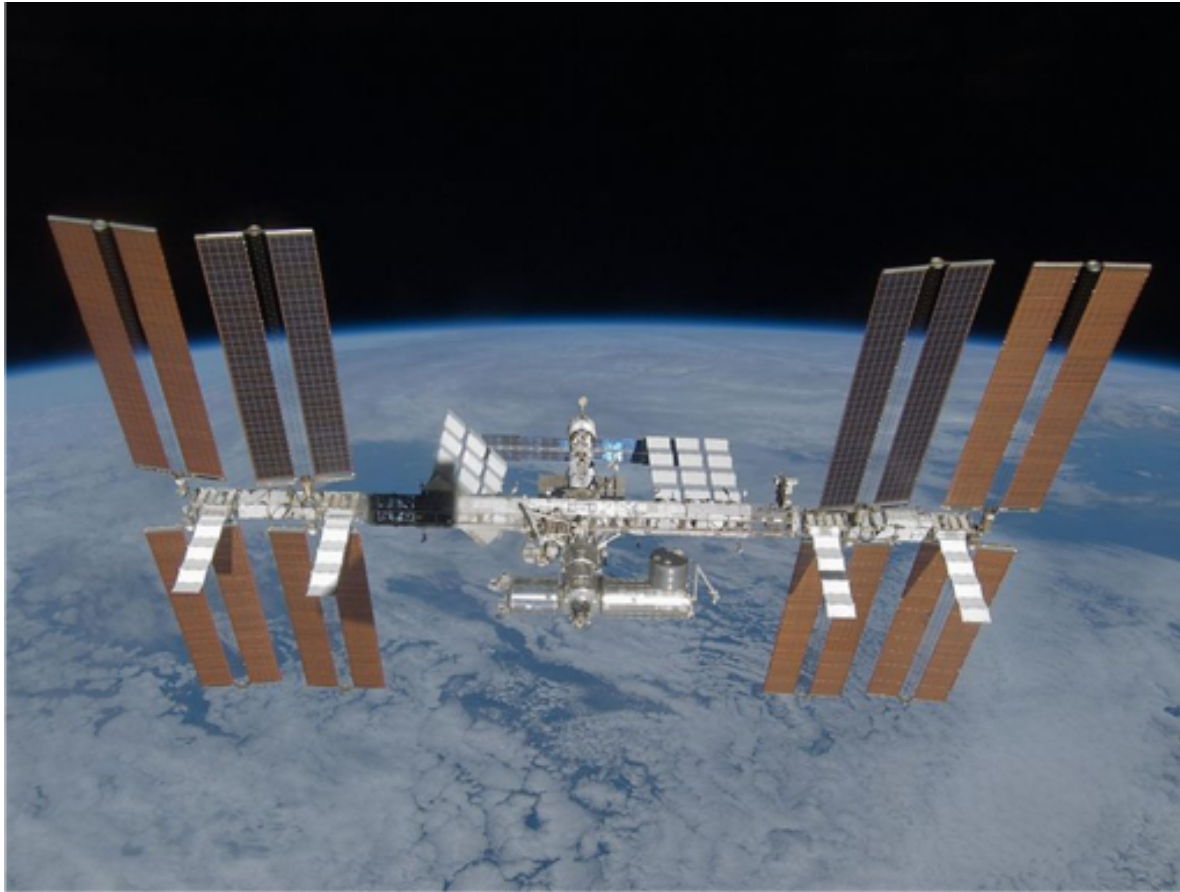
0.2 eV

熱速度

電子  $10^5 \text{ m/s}$

イオン  $10^3 \text{ m/s}$

# 宇宙ステーション



15カ国参加

高度 400km

日本実験モジュール  
「きぼう (JEM)」

国際宇宙ステーション (ISS)



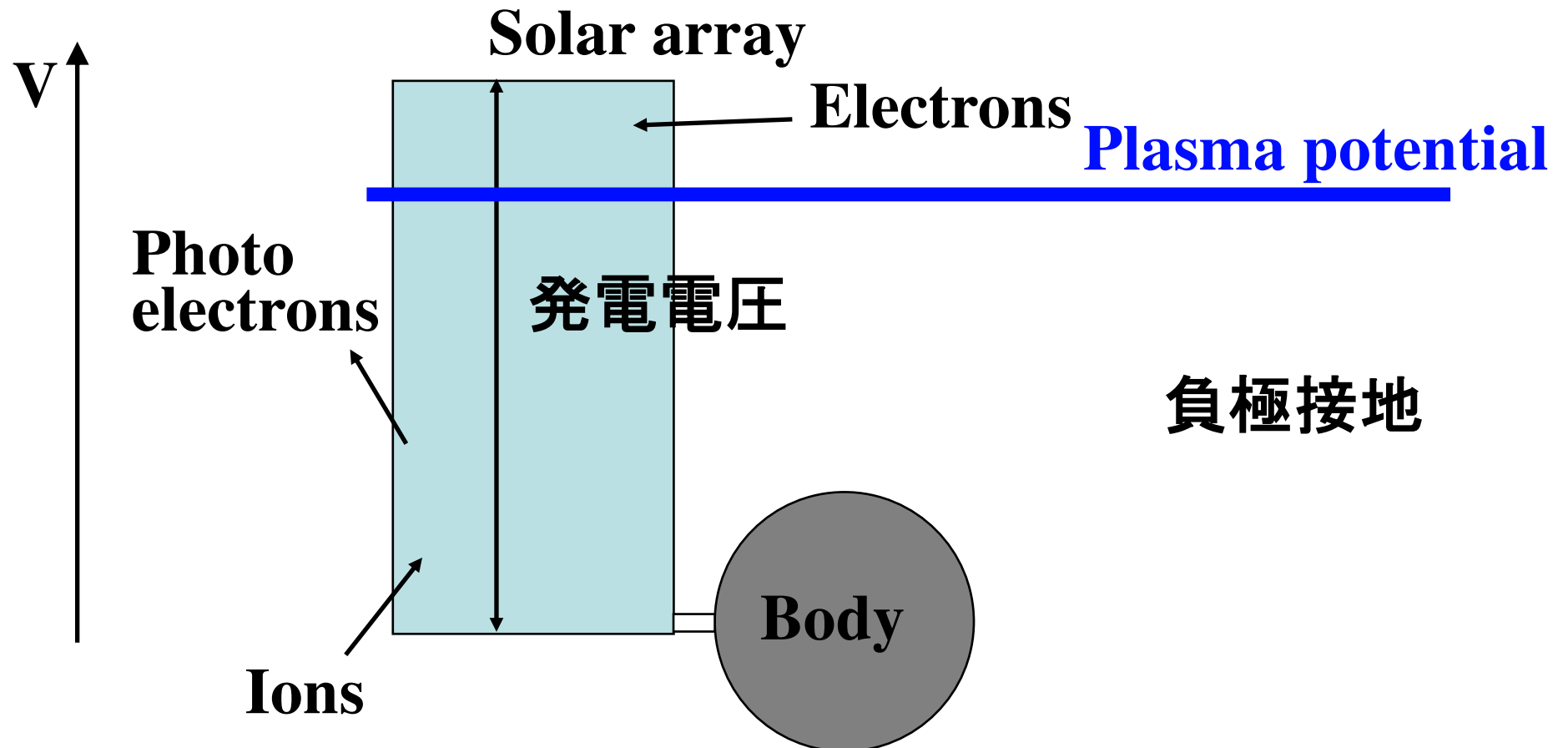
# 宇宙機の電位 LEO

プラズマの温度程度負に帯電

$$j_i \ll j_e$$

$$10 \sim 100 \mu\text{A}/\text{m}^2 \quad 1 \sim 10 \text{mA}/\text{m}^2$$

しかし発電していれば...

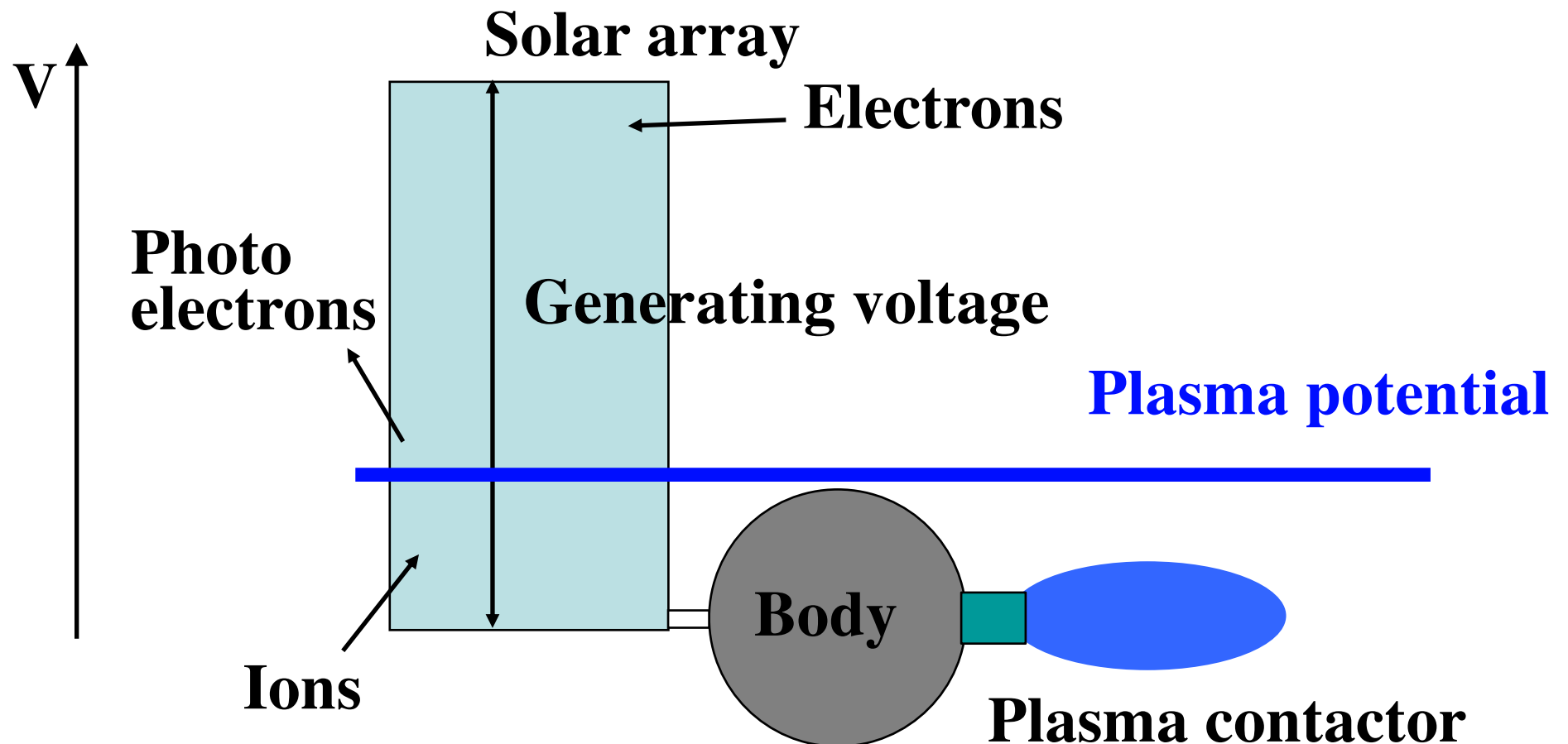


太陽電池アレイの負極を衛星グラウンドに接続

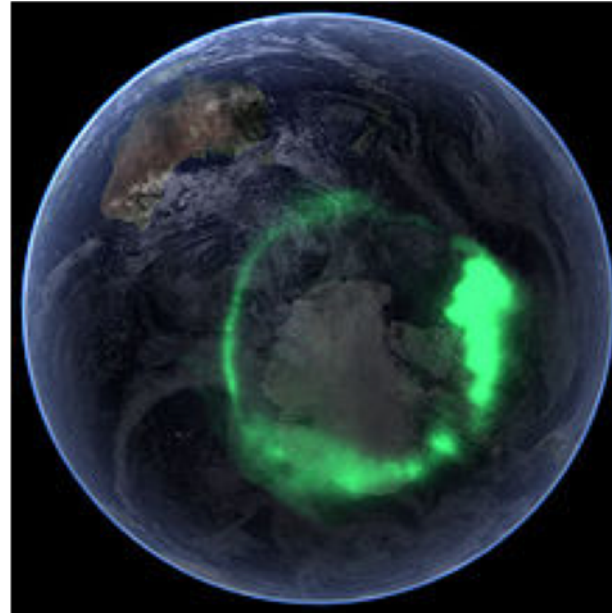
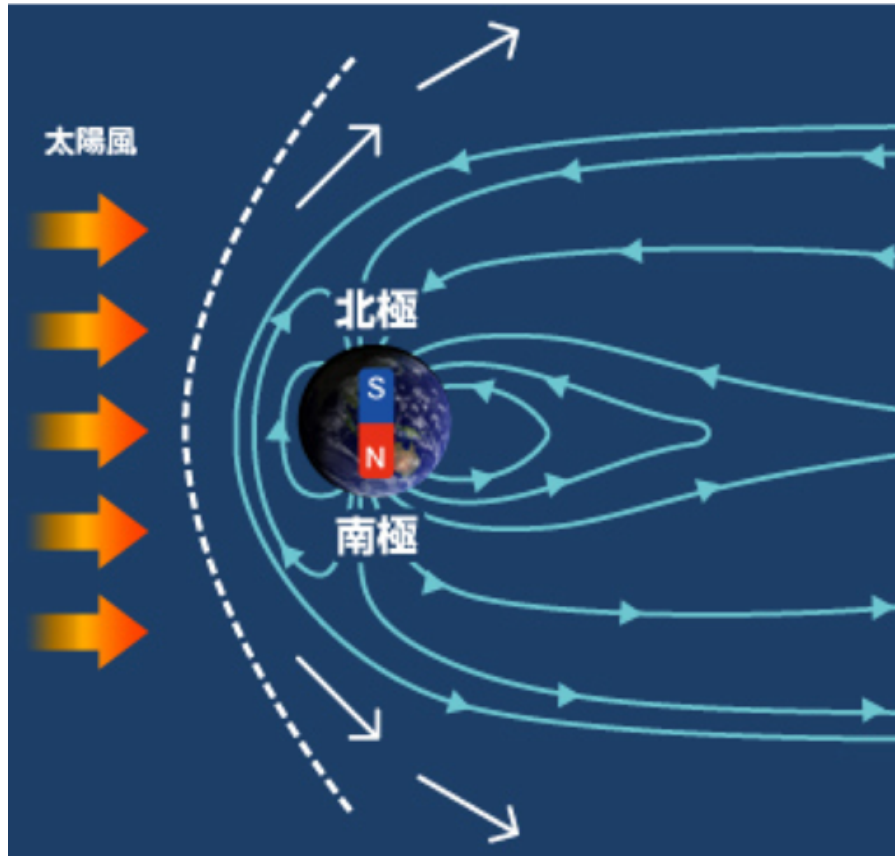


# Spacecraft potential in LEO

With plasma contactor



# 極



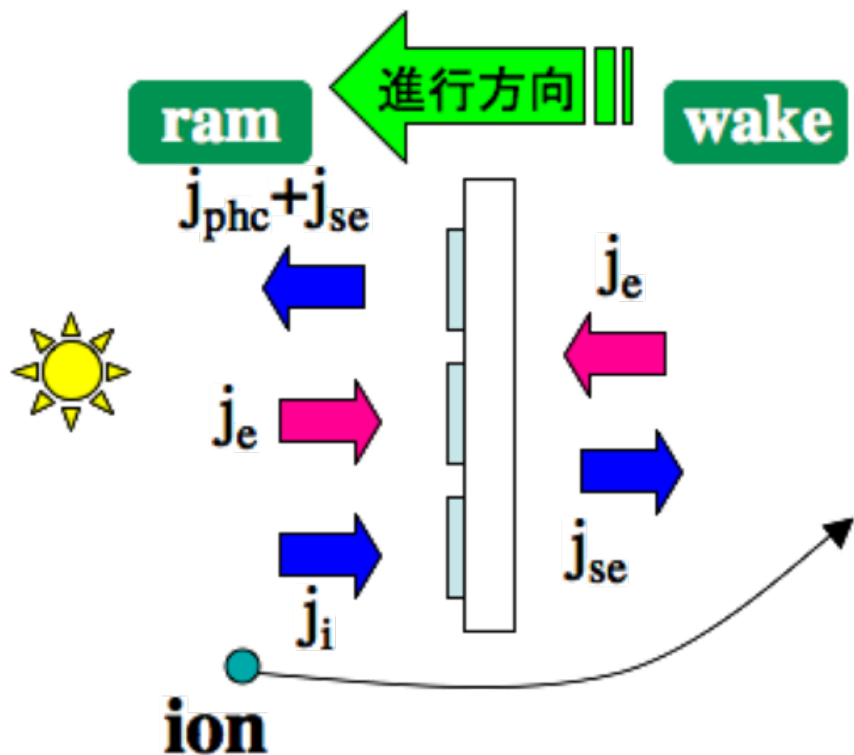
地球は合成写真



# 宇宙機の帯電 PEO

オーロラ帯

LEO環境 + GEO環境



LEOのプラズマだけでなく  
10 keV以上の電子も来る

Wakeにはイオンは回  
り込めない

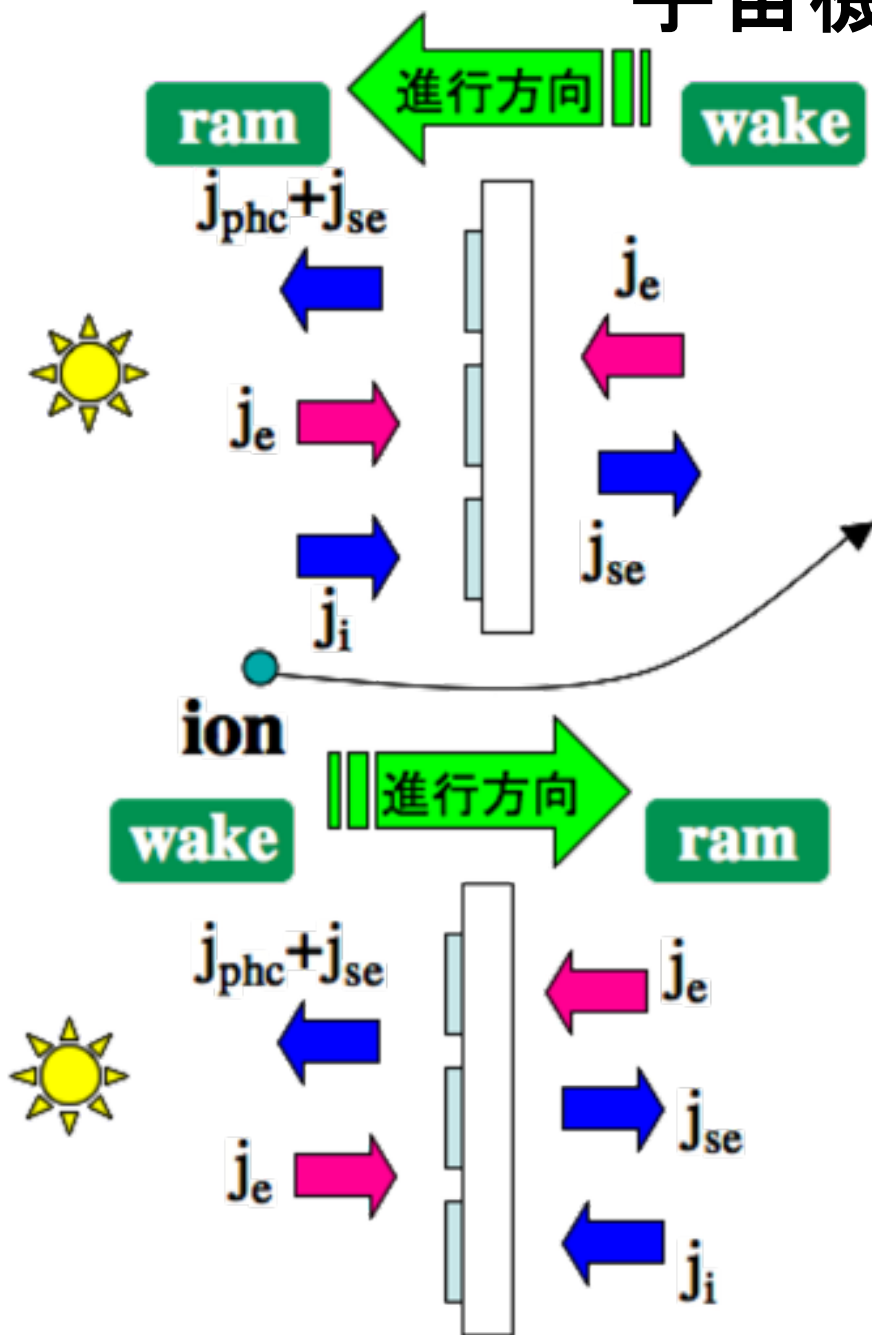
衛星軌道速度 > イオン熱速度

$\phi_s \approx 0$  で  $\phi_d < 0$  になる場合がある

順電位勾配

normal potential gradient

# 宇宙機の帯電 PEO



他にも帯電の可能性が...

ram 低エネルギープラズマ

$$\phi_s < 0 \quad \phi_d - \phi_s > 0$$

wake 高エネルギープラズマ

$$\phi_s < 0 \quad \phi_d - \phi_s > 0$$

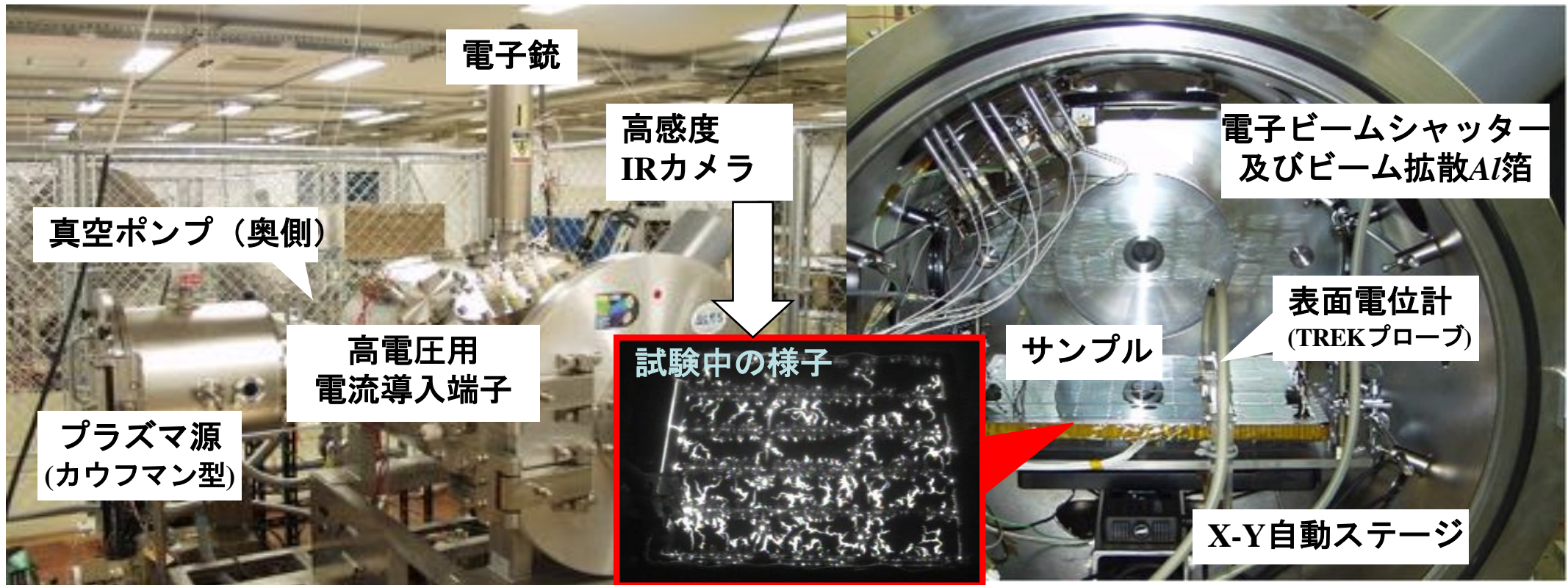
# 持続放電対策

- 打ち上げ前に地上試験
- 衛星の耐放電性能試験
- 地上帯電放電試験法の開発



九州工業大学 宇宙環境ラボラトリー

# 静止軌道試験チャンバ（電子ビーム環境）



## チェンバ諸元

寸法	直径0.6m×奥行0.9m
到達真空度	$2 \times 10^{-4}$ Pa
ターボ排気速度	400 l/s

電子銃	最大加速電圧	30keV
	最大ビーム電流	$300\mu$ A
	ビーム直径	85mm(FWHM)
ビーム拡散アルミ箔厚		$0.7\mu$ m
ビーム拡散ビーム直径		260mm(FWHM)



# 地上試験法の国際標準を策定

**ISO-11221,**

**“Space systems -- Space solar panels -- Spacecraft charging induced electrostatic discharge test methods”**

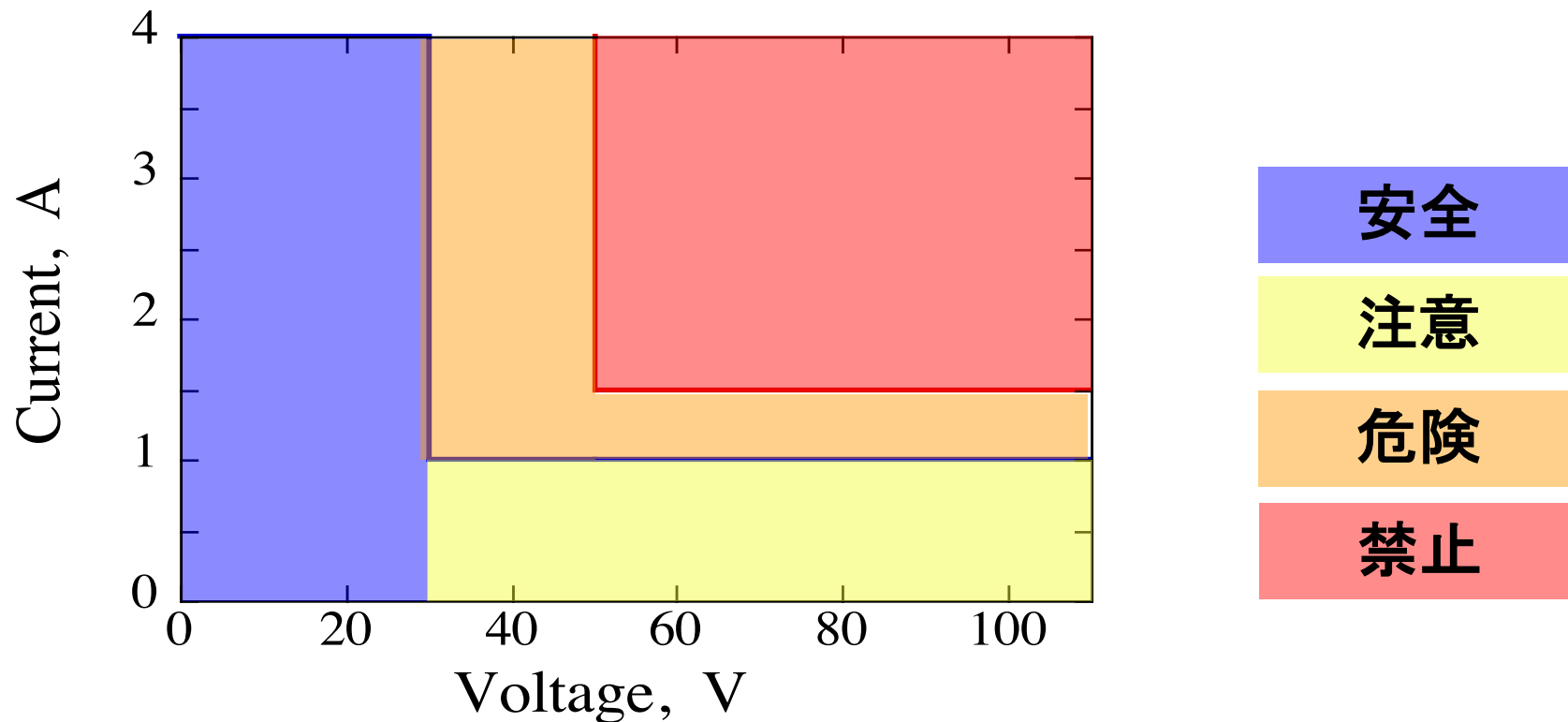
- 持続放電が発生しないことを試験で検証
- 放電閾値を計測
- 放電による太陽電池の劣化を見積もる

# JERG-2-211A 帯電・放電設計標準の策定

- 持続放電が発生することが分かっている条件では設計しない

取得データを取得

衛星帯電設計標準策定ワーキンググループへ反映



# 帯電最悪環境の国際標準を策定

**ISO-19923,**

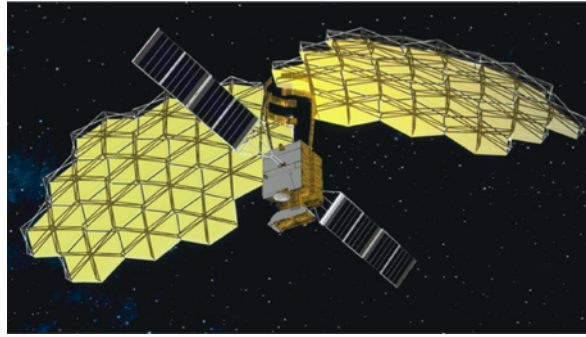
**“Space environment (natural and artificial) —  
Plasma environments for generation of worst case  
electrical potential differences for spacecraft”**

- **観測された静止軌道プラズマ環境から最悪帯電環境を提供**

# 衛星地上帯電放電試験(1999年より)



はやぶさ(2003)



きく8号(2006)



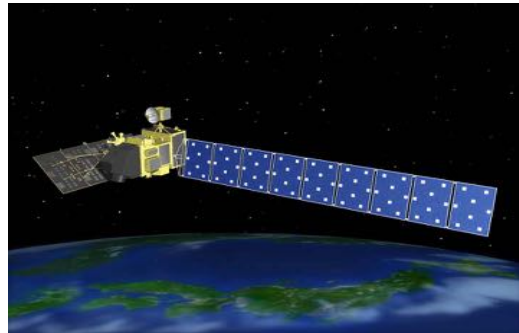
きずな(2008)



ひまわり7号(2006)



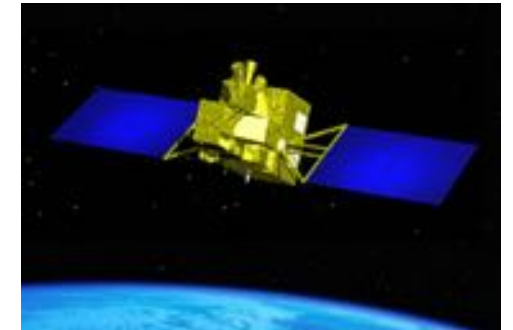
みどり2(2003)  
原因究明作業



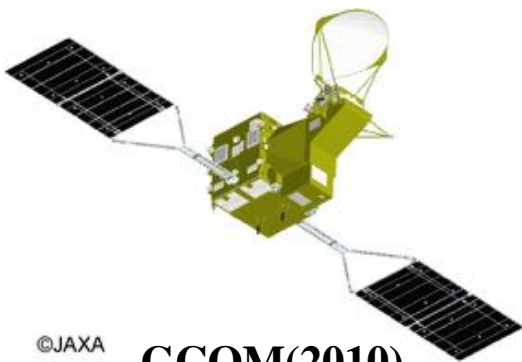
だいち(2006)



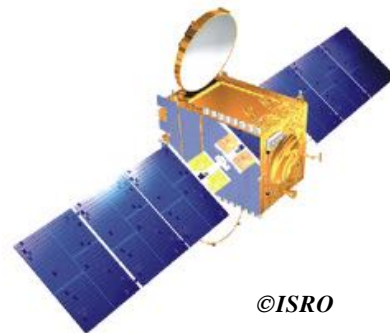
きらり(2005)



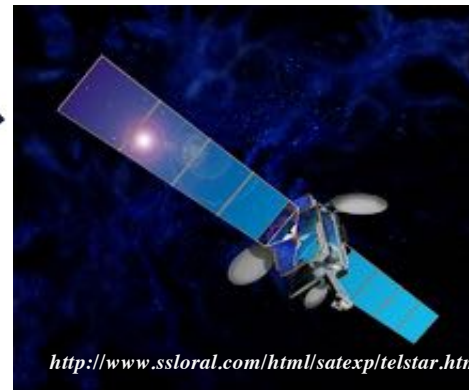
いぶき(2008)



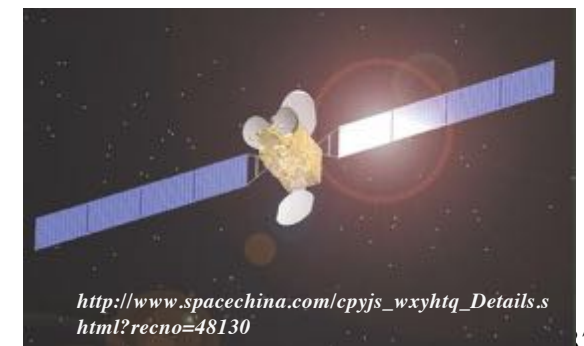
©JAXA  
GCOM(2010)



©ISRO  
インド



<http://www.sslora.com/html/satexpltelstar.htm>  
アメリカ



[http://www.spacechina.com/cpyjs\\_wxyhtq\\_Details.shtml?recno=48130](http://www.spacechina.com/cpyjs_wxyhtq_Details.shtml?recno=48130)  
中国

## 放電事故を防ぐには

- 打ち上げ前に国際標準に沿った放電試験をする
- 宇宙機表面に絶縁体を貼付けない
- 金属は必ず宇宙機構体に接地する
- 宇宙環境を理解する