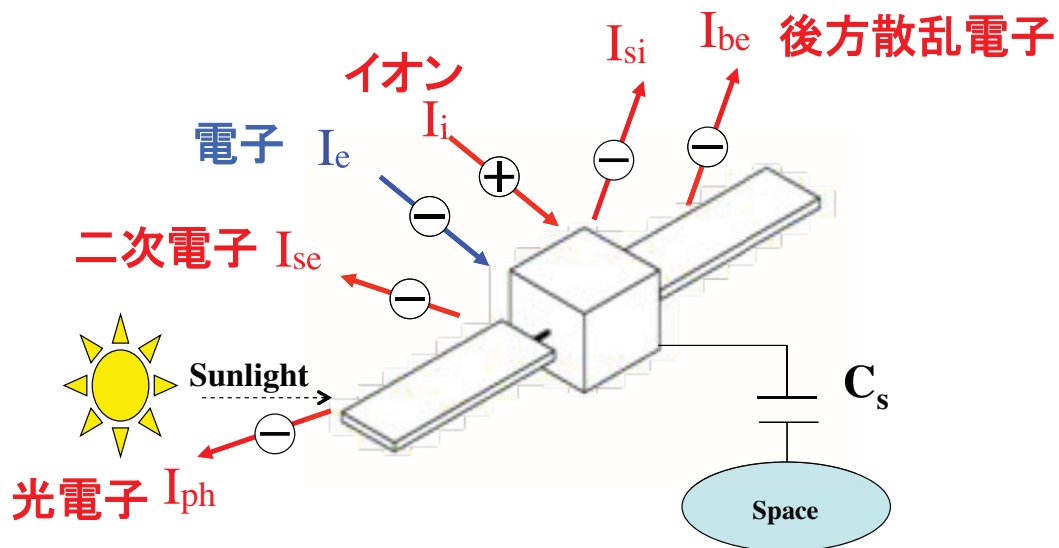


宇宙機の帯電放電

九州工業大学
宇宙環境技術ラボラトリー
豊田和弘



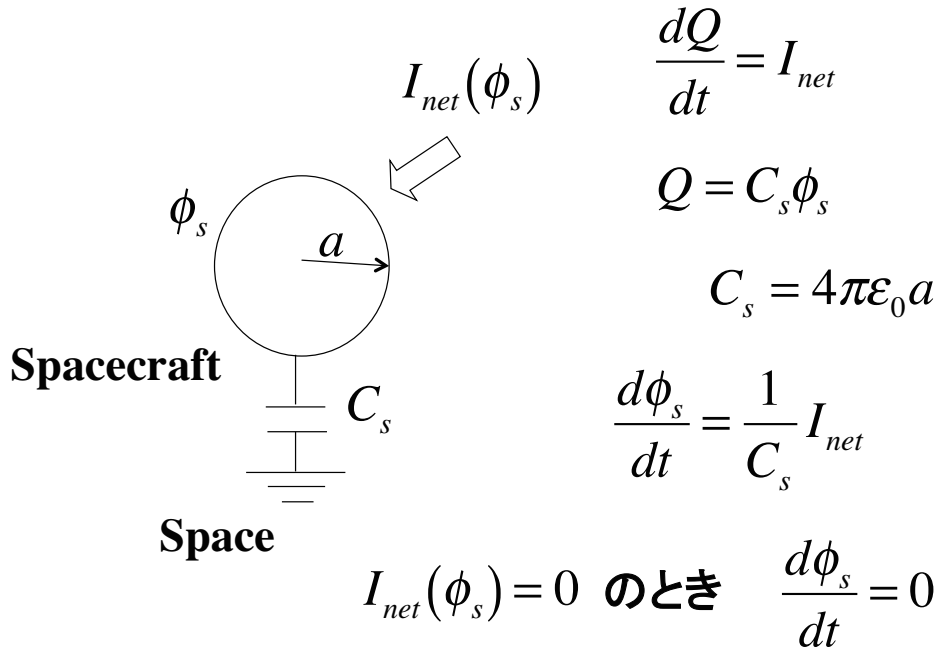
宇宙機の流出入電流



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



宇宙機の電位と電流



3



宇宙機電位 GEO

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

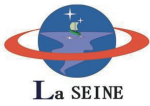
$$j_{ph} > j_e > j_i$$

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

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

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

6



宇宙機電位 GEO

double Maxwellian

$$j_{net}(\phi_s) = \sum_{k=1}^{k=2} \left[j_{0_{i_k}} (1 + e|\phi_s|/kT_{i_k}) - j_{0_{e_k}} \exp(-e|\phi_s|/kT_{e_k}) \right] \quad \phi_s < 0$$

$$\phi_s \approx -\frac{kT_{e_2}}{e}$$

-10kV ~ -30kV

光電子電流あり

$$j_{net}(\phi_s) = \sum_{k=1}^{k=2} \left[j_{0_{e_k}} (1 + e\phi_s/kT_{e_k}) - j_{0_{i_k}} \exp(-e\phi_s/kT_{i_k}) \right] \quad \phi_s > 0$$

$$- j_{ph_0} \exp(-e\phi_s/kT_{ph}) (1 + e\phi_s/kT_{ph})$$

$$\phi_s \approx \frac{kT_{ph}}{e} \ln \left[j_{ph_0} (1 + e\phi_s/kT_{ph}) / j_{0_{e_2}} \right]$$

$$\phi_s \sim \frac{kT_{ph}}{e}$$

+2V ~ 5V 7



絶縁体表面の電位

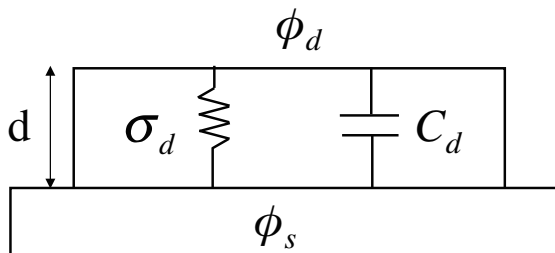
$$C_d \frac{d(\phi_d - \phi_s)}{dt} = (j_i - j_e + j_{se} + j_{be} + j_{ph}) - \frac{\sigma_d}{d} (\phi_d - \phi_s)$$

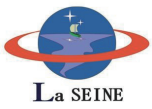
$$\frac{d(\phi_d - \phi_s)}{dt} = \frac{1}{C_d} (j_i - j_e + j_{se} + j_{be} + j_{ph}) - \frac{\sigma_d}{\epsilon_d} (\phi_d - \phi_s)$$

単位面積あたり: $C_d = \frac{\epsilon_d}{d}$

カバーガラス+接着剤 $C_d \sim 300 \text{ nF/m}^2$

$\sigma_d \sim 10^{-12} \text{ 1}/\Omega/\text{m}$



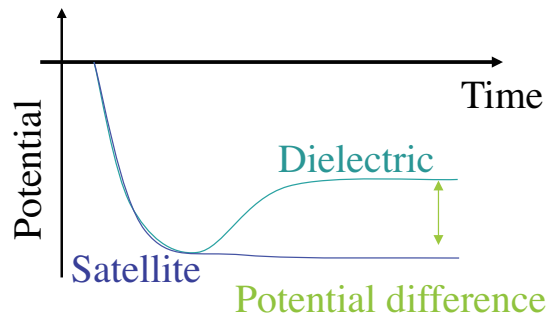
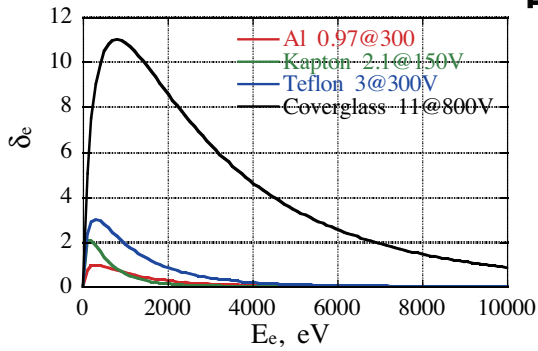


絶縁体表面の電位 GEO

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

日陰 $j_{ph} = 0$ $\phi_s < 0$

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

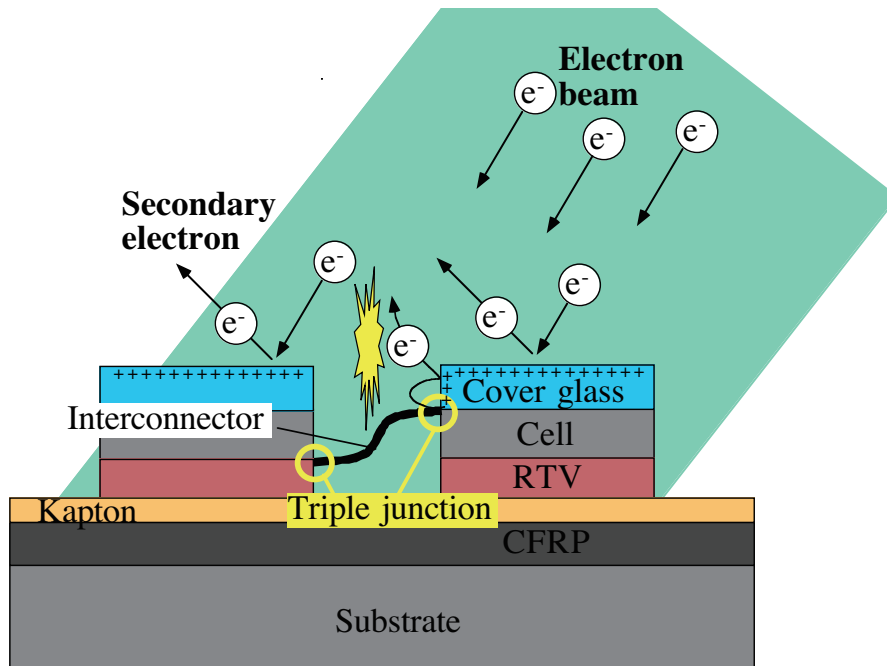


逆電位勾配 Inverted potential gradient

12



ビーム逆電位



13

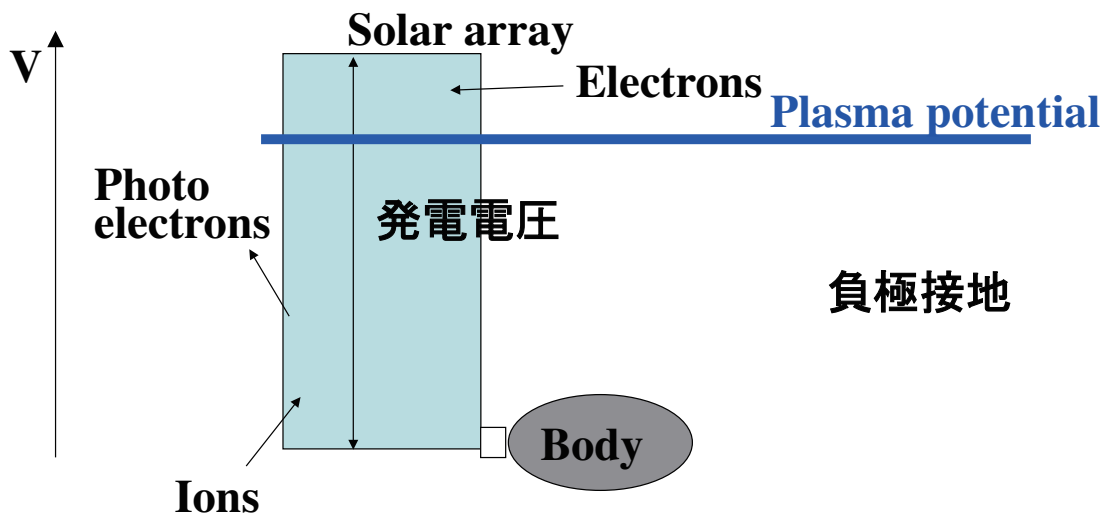


宇宙機の電位 LEO

プラズマの温度程度負に帯電

$$j_i \ll j_e$$

10~100 μ A/m² 1~10mA/m²

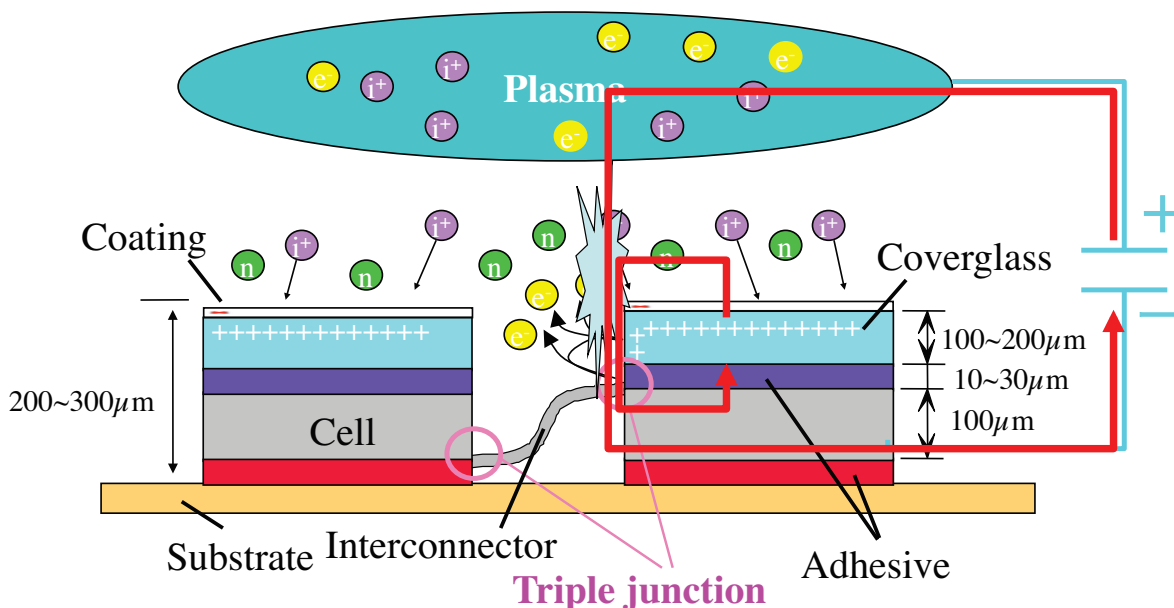


太陽電池アレイの負極を衛星グランドに接続

15



プラズマ逆電位

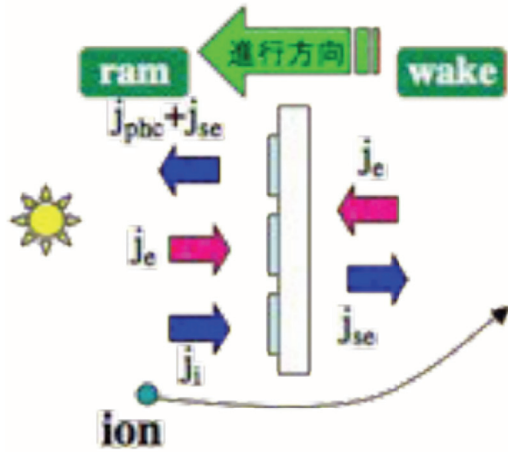


16



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

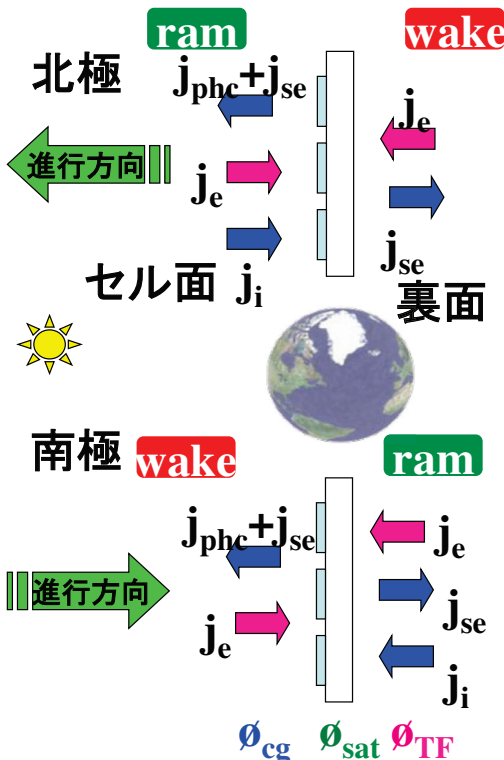
$\phi_s \approx 0$ で $\phi_d < 0$ になる場合がある

順電位勾配 normal potential gradient

17



PEOで考えられる帯電モード



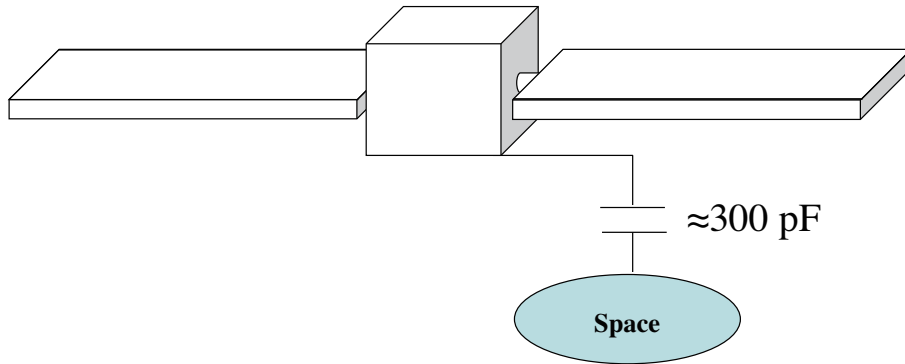
パドル	環境	衛星	誘電体	試験環境
セル面	ram	負	0	プラズマ逆電位
裏面	wake	負	>衛星	ビーム逆電位
		0 or 負	<衛星	ビーム順電位

パドル	環境	衛星	誘電体	試験環境
セル面	wake	負	>衛星	ビーム逆電位
裏面	ram	0 or 負	<衛星	ビーム順電位
		負	0	プラズマ逆電位

18



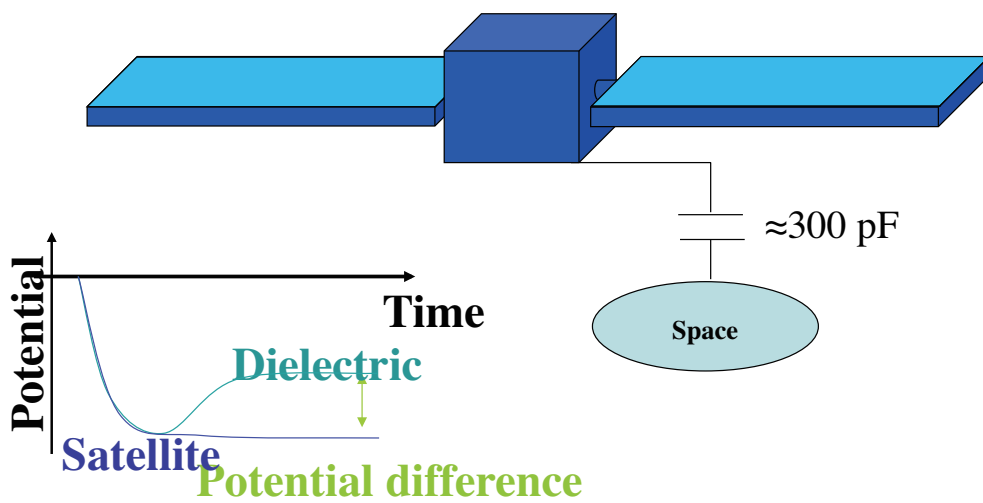
一次放電



19



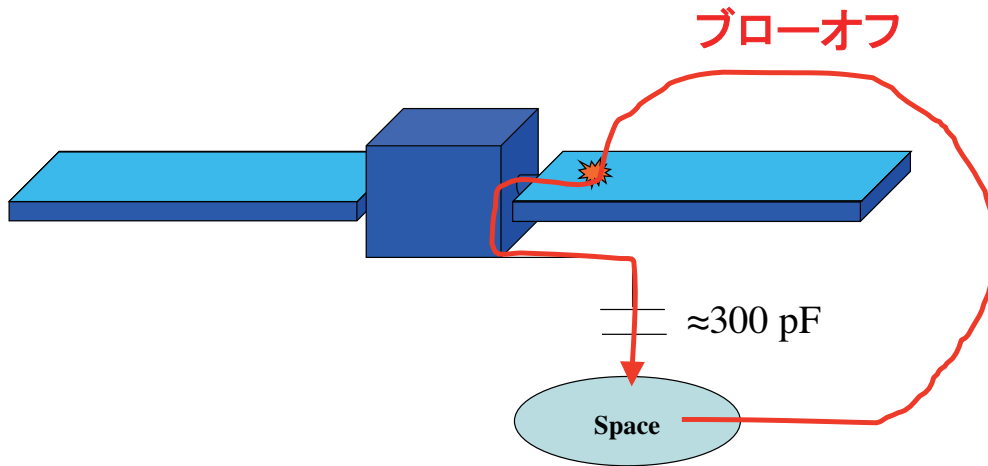
一次放電



20



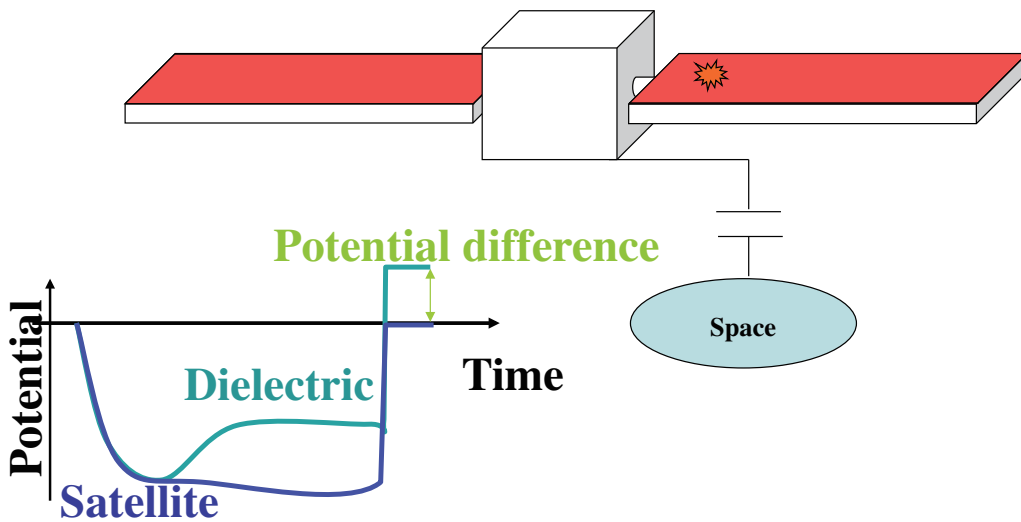
一次放電



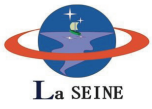
21



一次放電

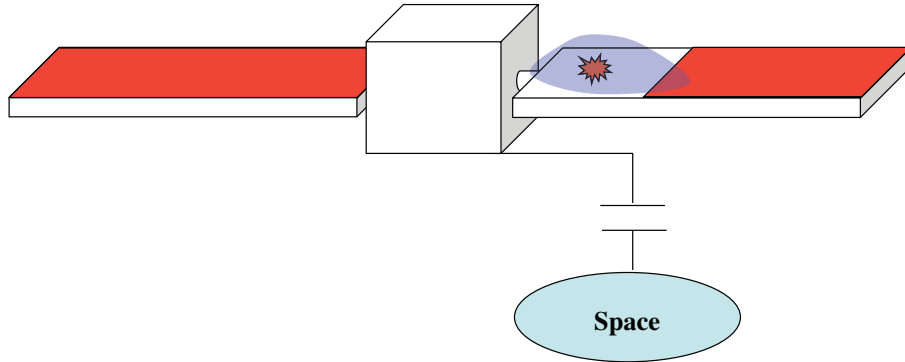


22



一次放電

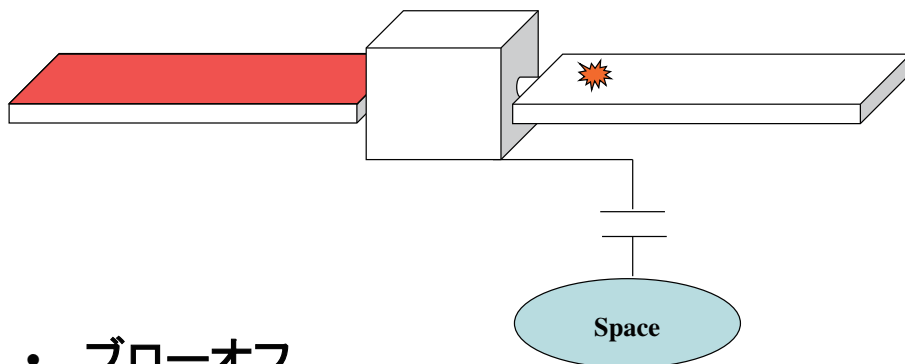
フラッシュオーバ



23



一次放電

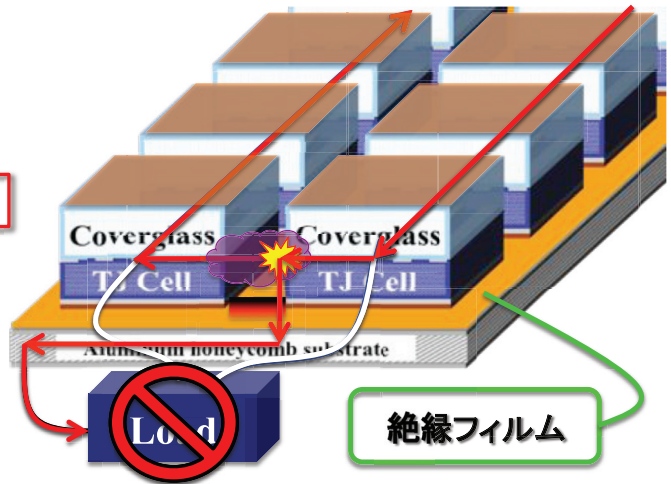
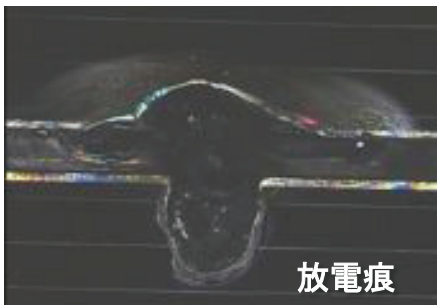
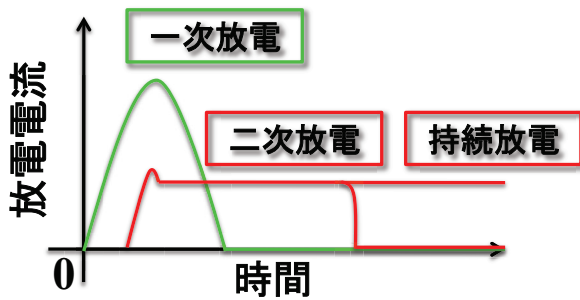


- ブローオフ
- フラッシュオーバ

24



持続放電 (Sustained Arc)



電力供給の停止

29

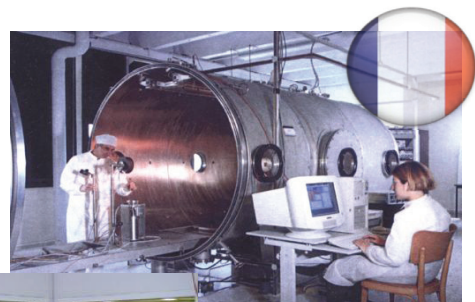


今までの帯電放電試験

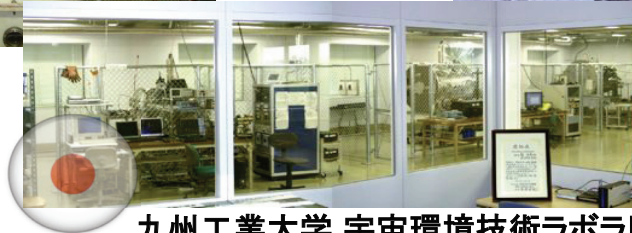
- ・ 各国の試験機関が別々の方法で試験を行っている



NASA



ONERA



九州工業大学 宇宙環境技術ラボラトリー

世界共通の試験法が必要

ISOの策定を目指す



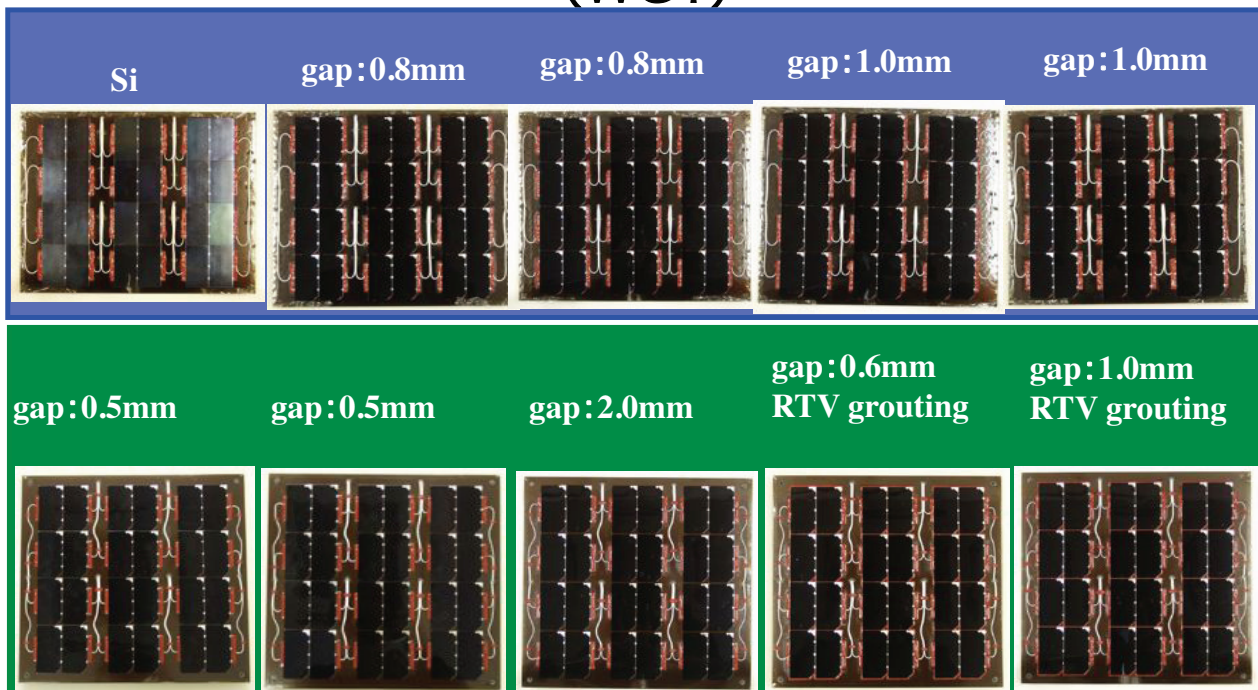
ISO-11221 "Space systems — Space solar panels — Spacecraft charging induced electrostatic discharge test methods"

- ・ 放電閾値を測定する
- ・ 帯電解析プログラムで放電回数を見積もる
- ・ 試験回路の外部キャパシタンスを決定する
- ・ サンプルを使って放電が設定回数以上発生するまで試験する
- ・ 持続放電が発生しないか、セルが破損しないかを確認
- ・ セルが破損する場合は低下する電力を見積もる
- ・ デザインを決定
- ・ システムデザインにも反映

32



衛星帯電設計標準策定ワーキンググループ (WG1)

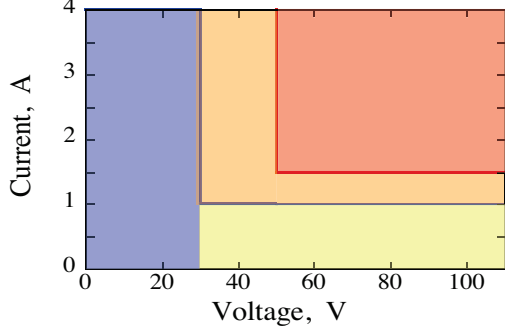


35

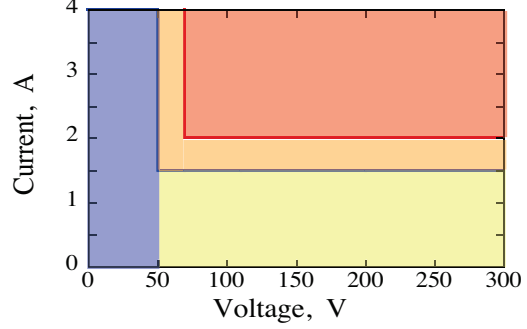


二次放電に対する安全運用条件

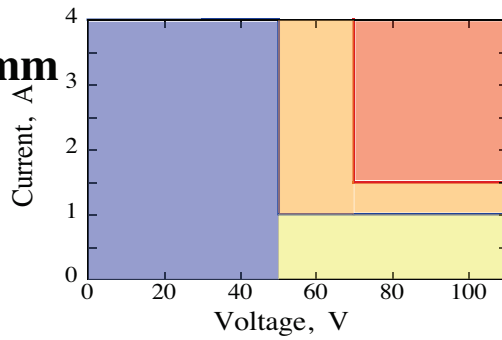
TJ 0.5~1.0mm



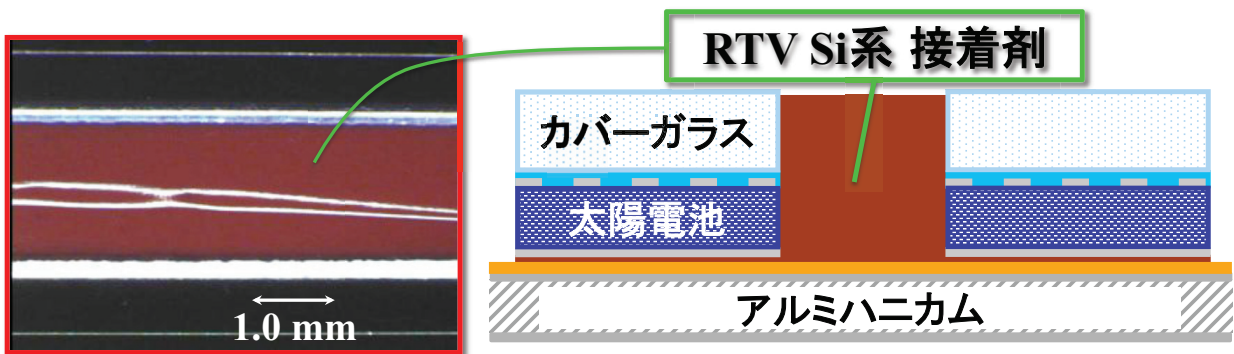
TJ 2.0mm



Si 0.5mm

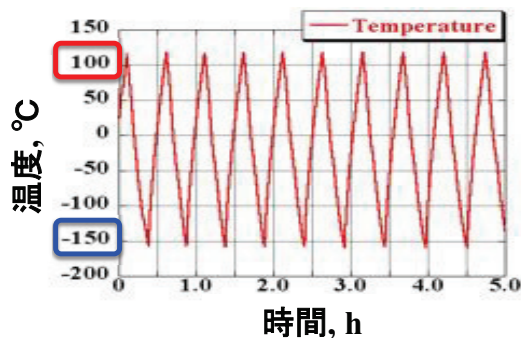


放電抑制手法 (グラウティング)





宇宙環境曝露試験



-150~100°Cを1000サイクル

	照射範囲 [cm]	エネルギー [MeV]	フルエンス [個/cm ²]	フラックス [個/cm ²]
陽子線	10×10	1	10 ¹⁶	1.25×10 ⁹
電子線				5.0×10 ⁵

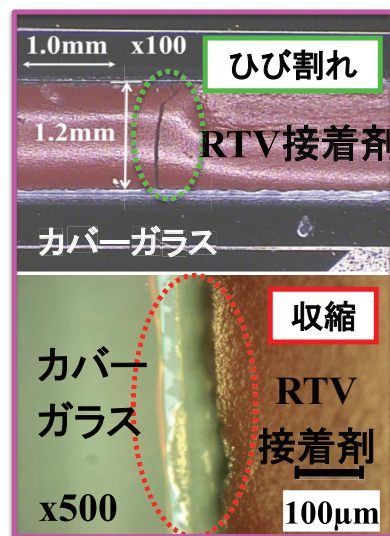
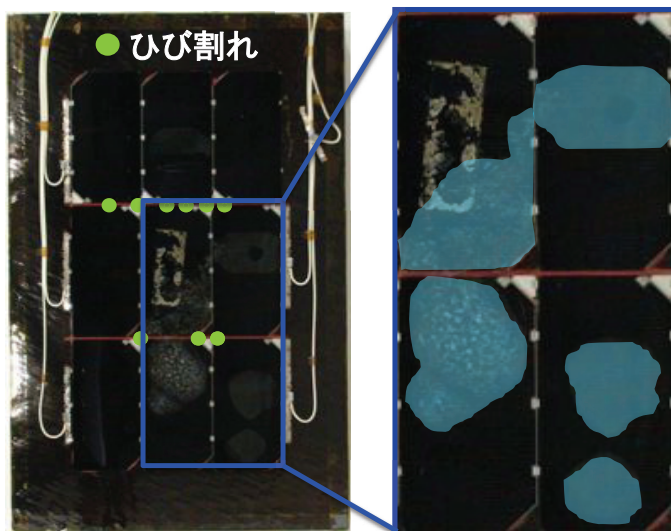
10年分の照射量に相当

38



宇宙環境曝露試験

ひび割れ、RTV接着剤の収縮、カバーガラスの剥離

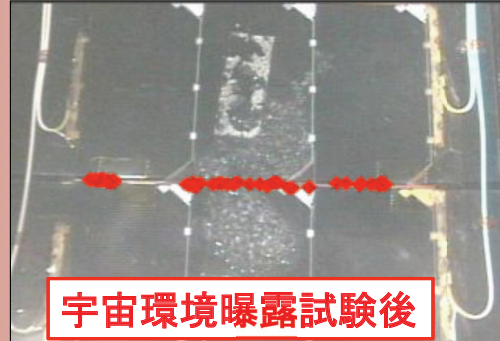
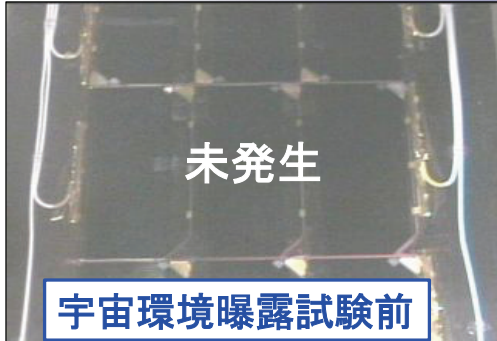


39



宇宙環境曝露による一次放電試験

放電の発生箇所



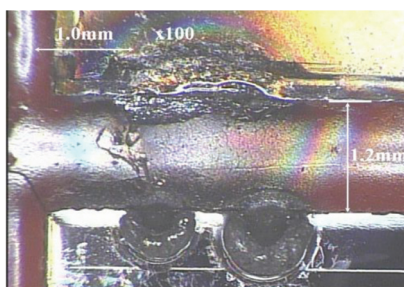
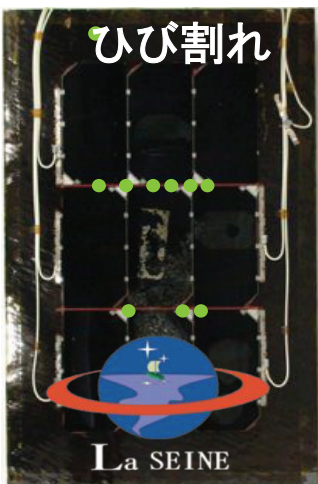
◆宇宙環境曝露試験後のみ一次放電の発生

- ひび割れ、収縮、剥離における放電の発生を確認
- 持続放電が発生するのかを検証

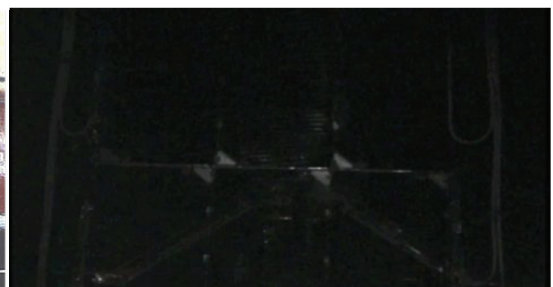
40



宇宙環境曝露による持続放電試験



放電痕



- 数十~数百msの長い二次放電を3回確認
- 太陽電池セルの劣化を確認

二次放電の発生

•二次放電に対する耐性: ✕

•持続放電に対する耐性: △

41



今後の研究課題

- ・ 経年劣化が耐放電性能に与える影響
 - RTVグラウティング、ポリイミド絶縁フィルム
- ・ 帯電解析用データ
 - 二次電子、光電子、抵抗値など
- ・ 軌道データ
- ・ 帯電放電抑制技術
- ・ 帯電放電試験技術