2018 OEGセミナー＠御茶ノ水ソラシティ

# 新しい宇宙利用を切り拓く電子部品技術の研究開発

## ～宇宙では何が求められ、何が技術課題なのか？～

Oct. 25th 2018

JAXA 研究開発部門　第一研究ユニット　部品領域
新藤 浩之

# Topics

## 何が求められるか？

1. 最近の宇宙機ミッション　（※当日投影にて紹介）
2. 宇宙用部品に対する要求と技術トレンド

## 何が技術課題か？

3. 技術課題とJAXA研究開発の取り組み
4. 重要度が増す故障解析技術・検査技術
5. まとめ

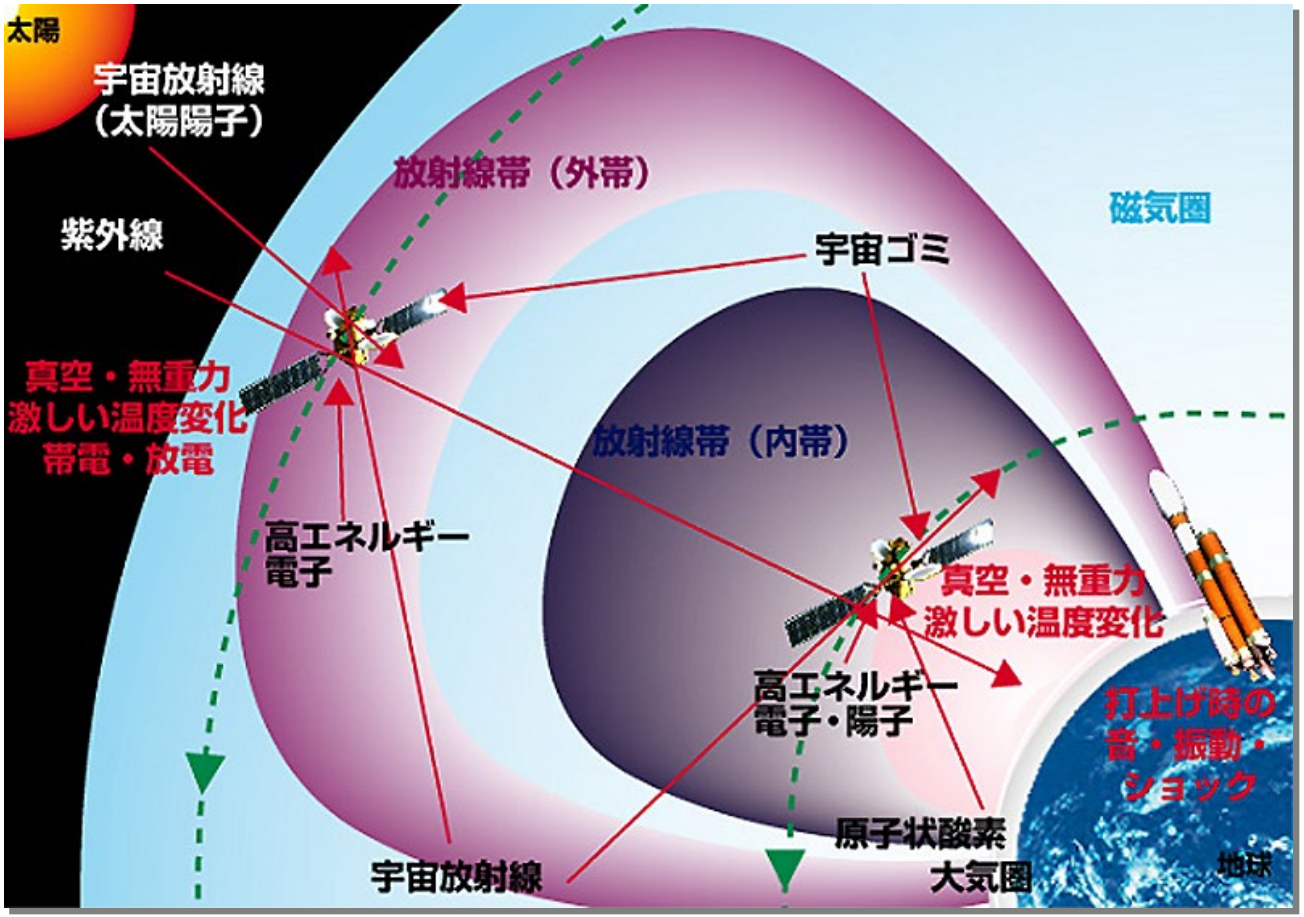
## 2. 宇宙用部品に対する要求と技術トレンド

地球を取り巻く環境と耐環境性要求

宇宙用部品に対する一般的な要求事項

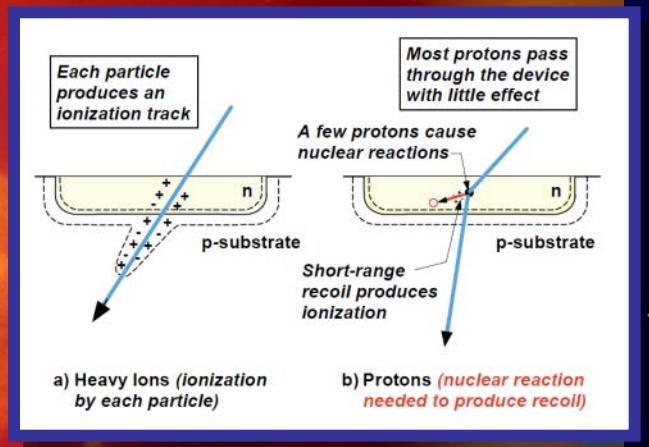
今後求められる技術トレンド

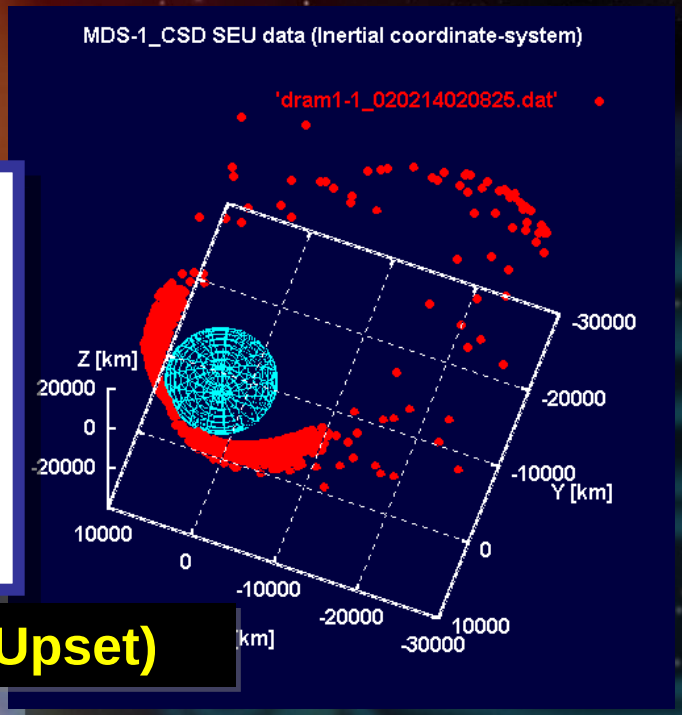
# 宇宙で電子部品を使うためには？



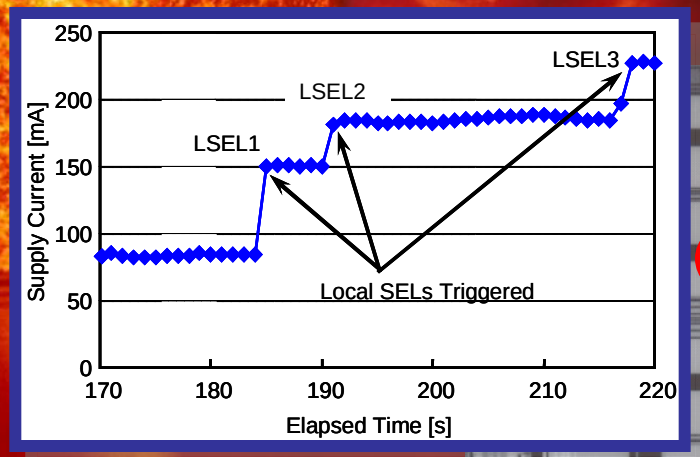

宇宙で電子部品を使うためには、宇宙特有の厳しい環境に耐えることが条件となる（高信頼性）。特に宇宙放射線の影響は、半導体素子の高集積化に伴い、徐々に深刻化（耐放射線性）。

# 宇宙放射線影響（Single Event Effect）

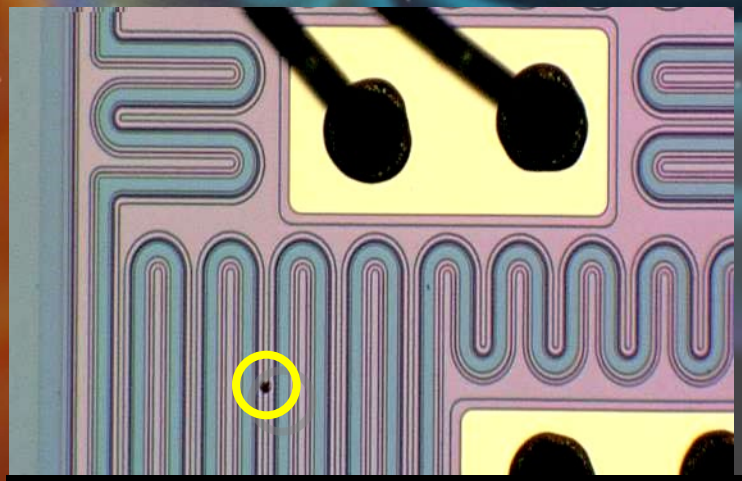



**SEU (Single Event Upset)**



**SEL (Single Event Latchup)**



**SEB (Single Event Burnout)**

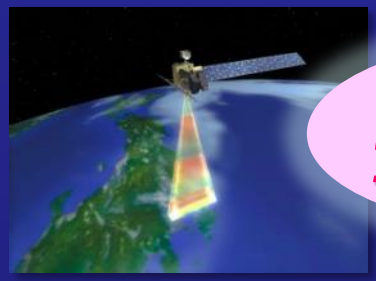
# 宇宙用部品に対する一般的要求

Some unique characteristics, tests are required that most commercial and industrial applications do not demand.

- ✓ *Temperature -55 to 125 degreeC or wider*
- ✓ *Hermetic packaging*
- ✓ *Higher vibration capability*
- ✓ *Control of outgassing & flammability*
- ✓ *Long reliability (1 to 10 FITS)*
- ✓ *Low defect levels (10ppm)*
- ✓ *Radiation hardness*
- ✓ *Lot testing (Flight lots need to be assured.)*
- ✓ *Lot homogeneity & traceability*
- ✓ *Strictly controlled by specifications*

# 宇宙機ミッションが求めていること

地球観測
通信・測位



高度化する
ミッション要求

宇宙科学
惑星探査

より多くの情報を
（高分解能・高精細画像
“点”から”面”の観測へ）

正確にリアルタイムに
（大容量・高速データ転送）

より遠くの場所を
（超長距離航行/地球帰還）

詳細に知る
（高精細観測で知見獲得）
（通信系の高精度化による
探査領域拡大/大規模観測）

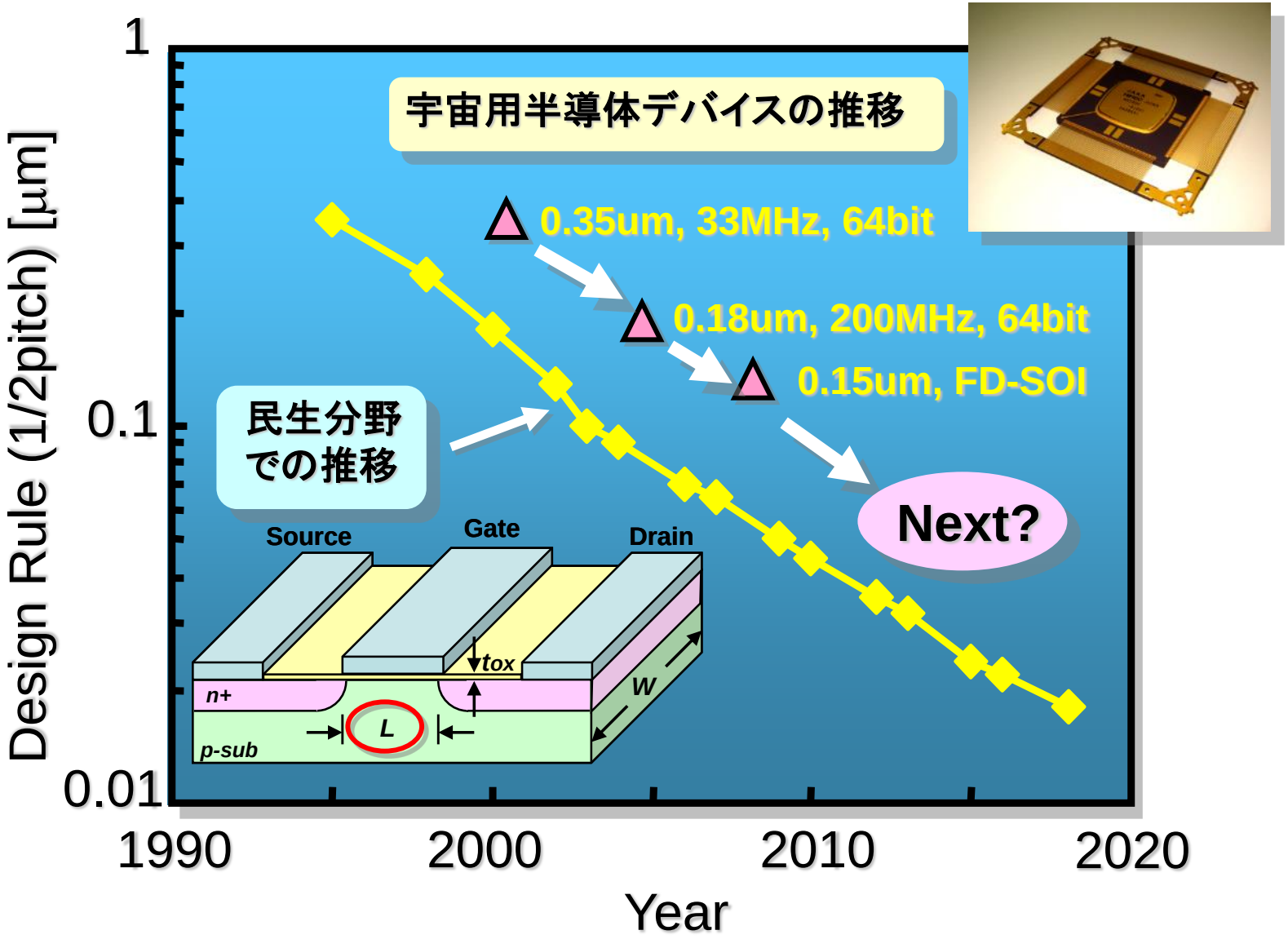
**Point**

宇宙機を支えるエレクトロニクス（電子部品）を
如何に進化させ、ミッション要求に応えるか？

# ３．技術課題とJAXA研究開発の取り組み

## ① 計算機系電子部品の研究開発

# 民生 / 宇宙での微細化（スケーリング）推移



# 現状分析と技術課題 （計算機の高性能化）

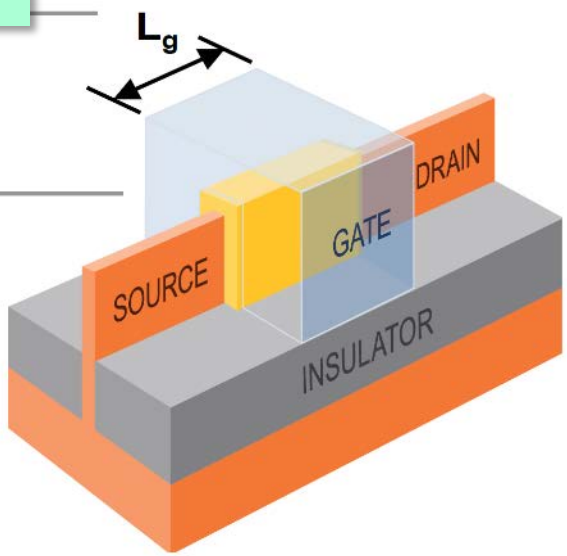
## 宇宙用LSIの技術課題（1） ナノスケール先端技術の耐宇宙環境性確保

### Fin-FET technology

Gate length shrink enables performance scaling

FET is turned on its edge

- Lower supply voltage
- Reduced off-state leakage
- Faster switching speed – high drive current




https://www.globalfoundries.com/sites/default/files/product-briefs/product-brief-7lp-7nm-finfet-technology.pdf

民生最先端半導体プロセスでは、新構造・新材料の適用が加速しており、これらを宇宙機にも適用する要望が高まっている。

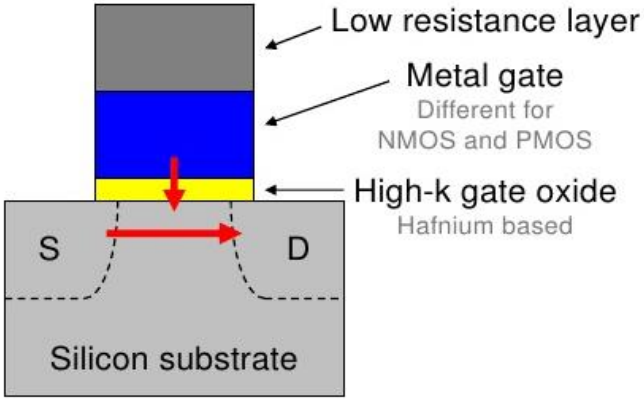
### High-k gate materials

**High-k Dielectric**

- Increases the gate field effect
- Allows use of thicker dielectric layer to reduce gate leakage

**HK + MG Combined**

- Drive current increased >20% (>20% higher performance)
- Or source-drain leakage reduced >5x
- Gate oxide leakage reduced >10x




Intel 45nm high-k metal-gate press release 2007

一方で、耐宇宙環境性は未知数で、分析が必要。

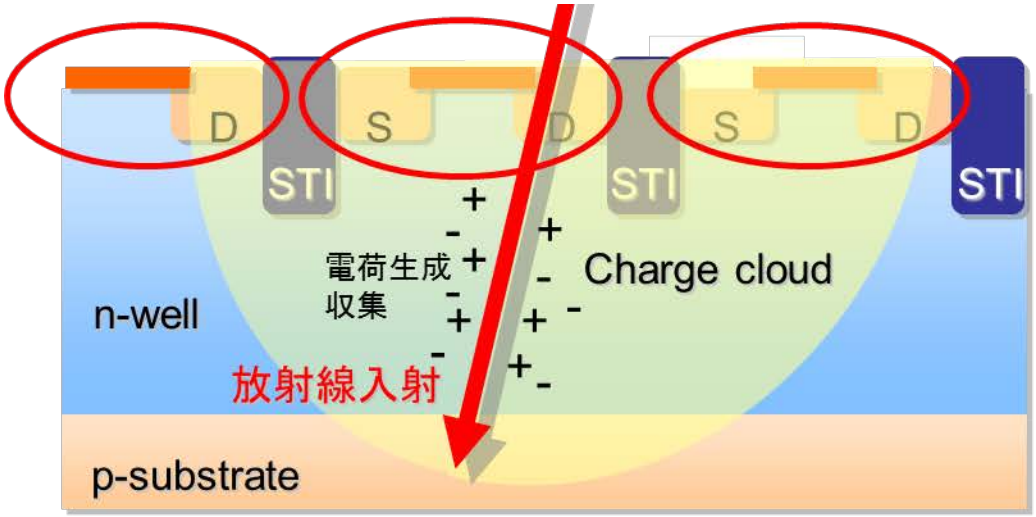
耐放射線性？
長期信頼性？
想定すべき故障モード？

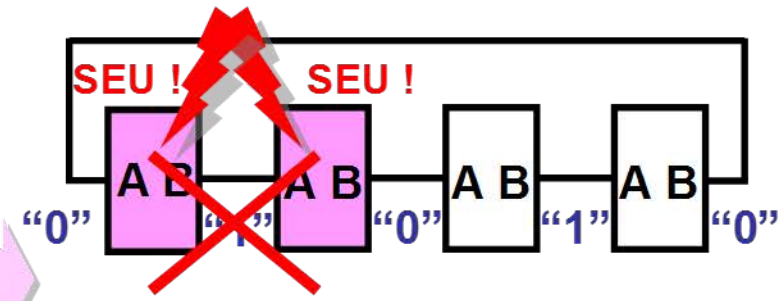
# ナノスケール集積回路RHBD技術の研究

## ナノスケール集積回路RHBD技術の研究

- ✓ ナノスケール集積回路（<90nm）では、耐放射線性向上策として現在主流のRHBD（Radiation Hardening by Design methodology）が機能しなくなる。
- ✓ ナノスケール集積回路にも対応できる新しいRHBD原理構築を目指し、回路技術研究を進め、次世代ASIC実現に資する（65～14nmを想定ターゲット）。

1つの放射線粒子で生成される電荷が多数のトランジスタ動作に同時に影響を及ぼす。



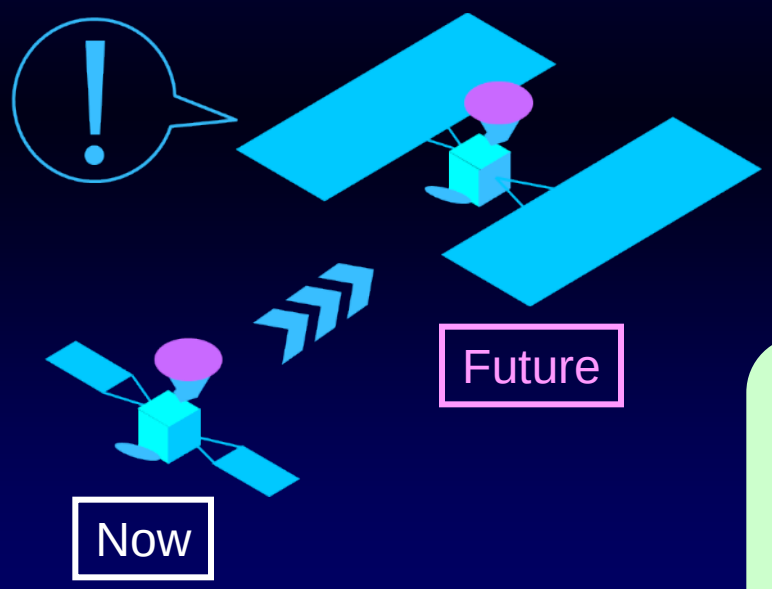



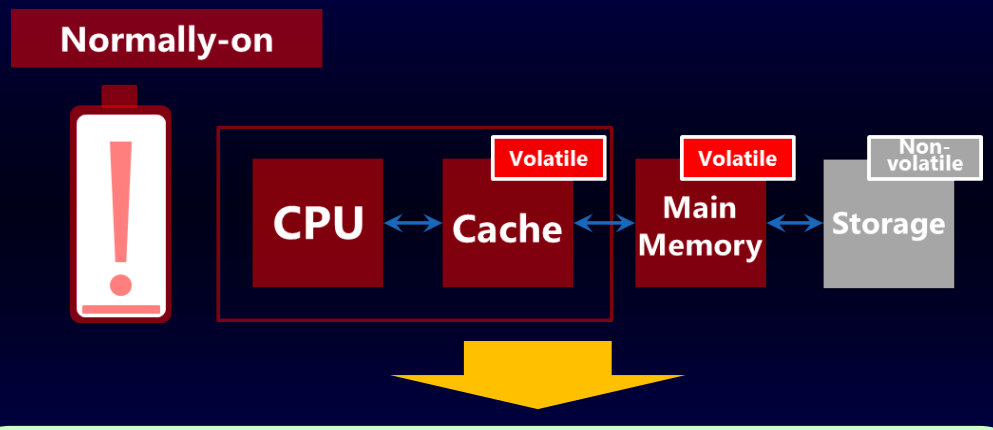

結果として、複数のノードの記憶情報が反転してしまい、DICE回路の原理が破綻する。

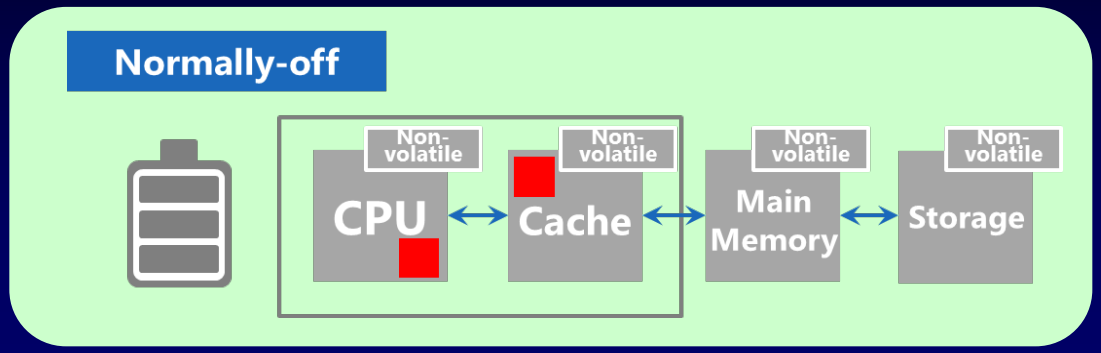
# 新しい概念研究: “Normally-off computing”

- ✓ Explosion of power consumption in orbit would be also inevitable.
- ✓ Huge solar paddles and power cells will be required to keep the satellite systems in the near future.
- ✓ Normally-off computing: To shut the power down whenever not being used.

如何にしてロジック/メモリの不揮発性を確保するかがカギ。



# 3. 技術課題とJAXA研究開発の取り組み

## ② 電源系電子部品の研究開発

# 宇宙機でのPowerMOSFETの用途

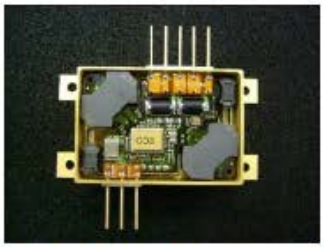
Power MOSFET : 電源を高効率にON/OFFするスイッチング素子として使用。

人工衛星での使用例

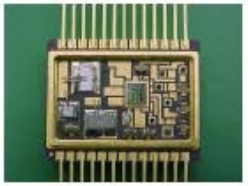
太陽電池(SAP)

二次電池

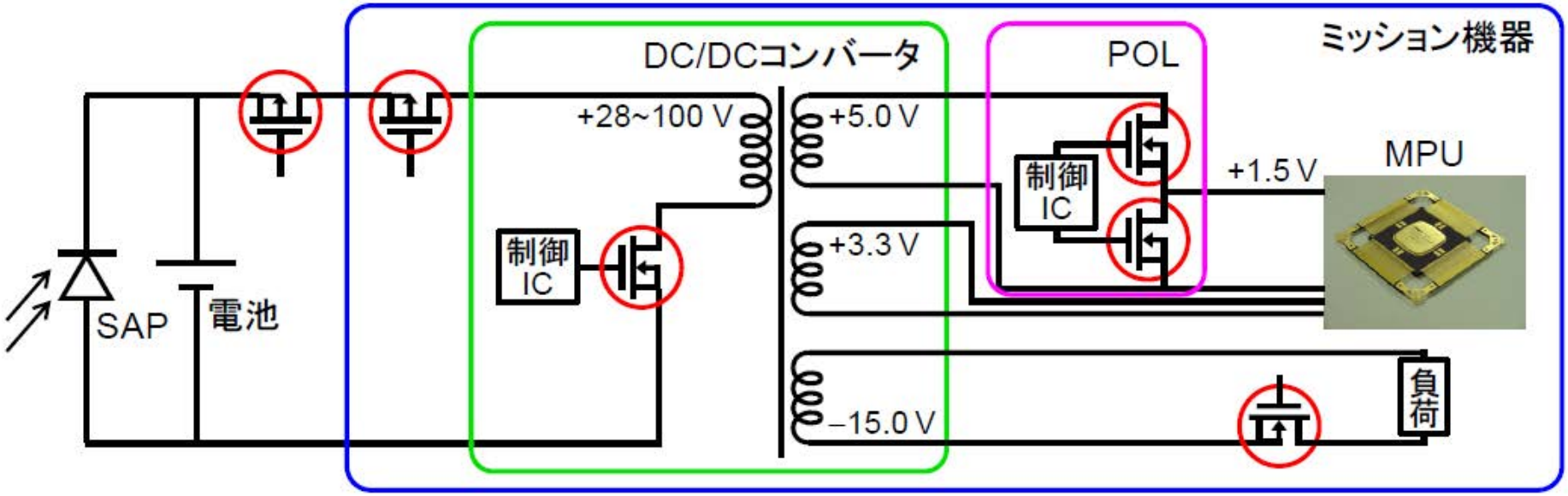
ミッション機器



DC/DCコンバータ

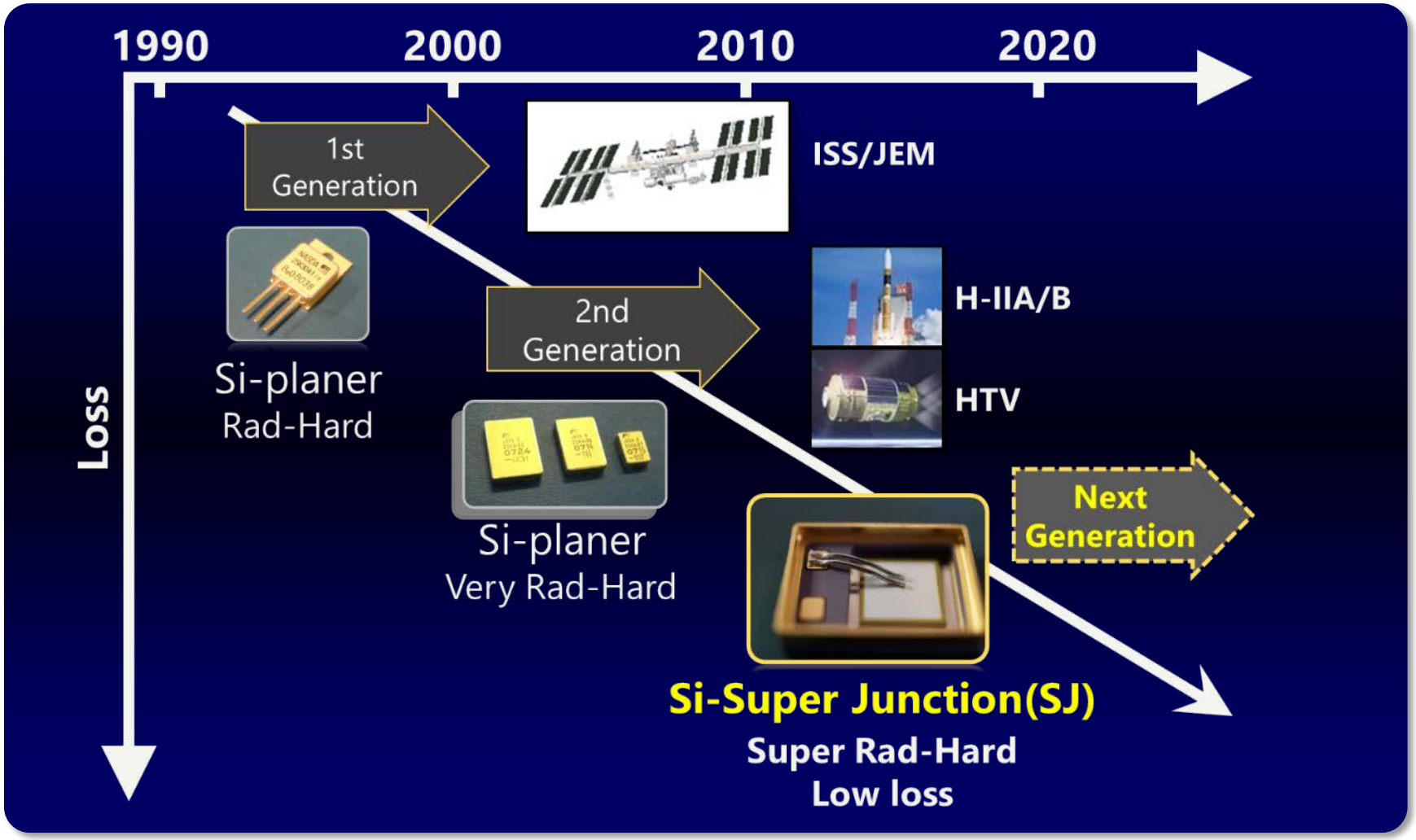


POL

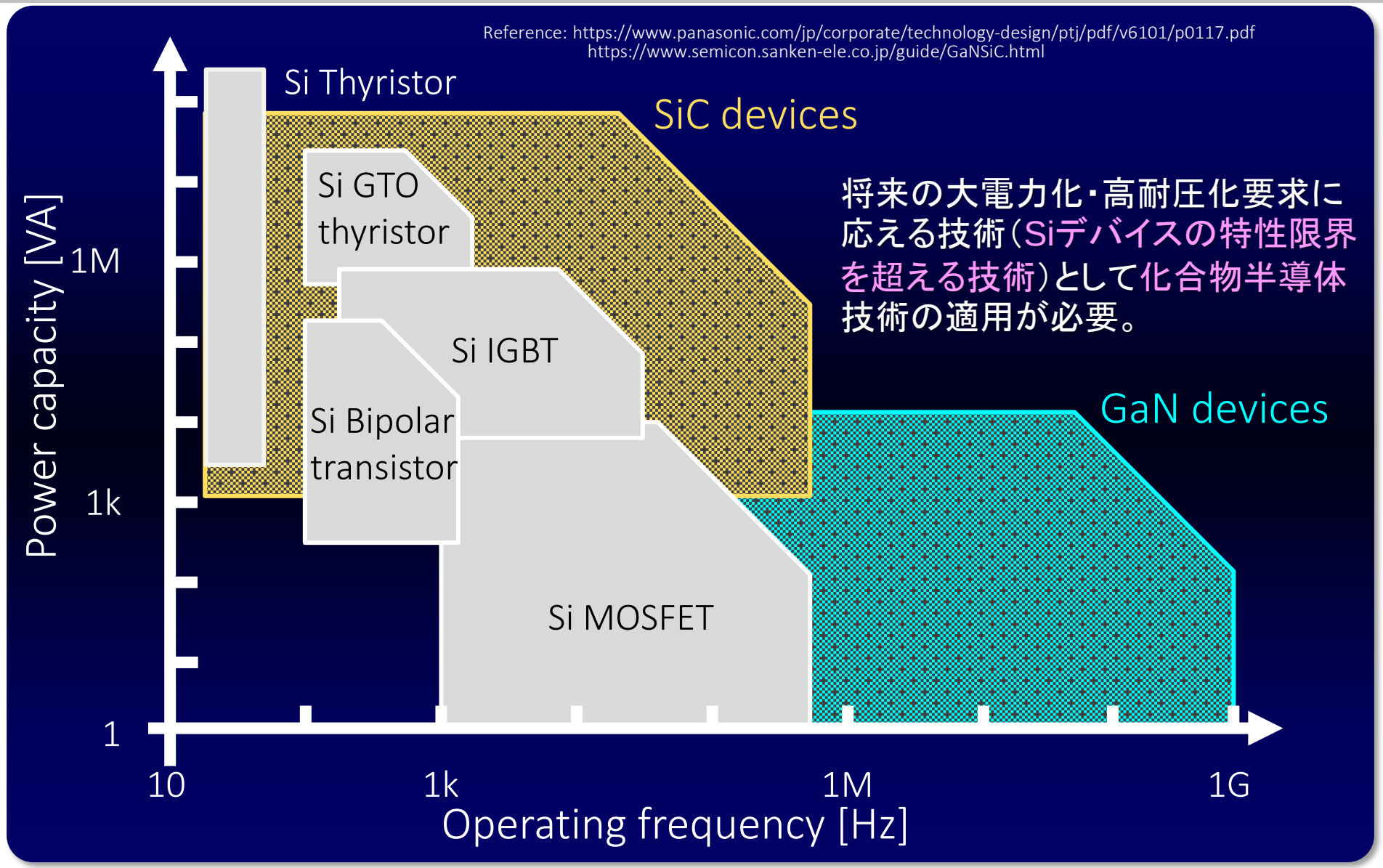


# 宇宙用パワーデバイスの研究開発

- ✓ 電源コンポーネントを支えるキーデバイスとして研究開発を継続。
- ✓ FY29にSJ-MOSFET開発を完了し製品供給開始。



# 現状分析と課題②（衛星の大電力化対応）

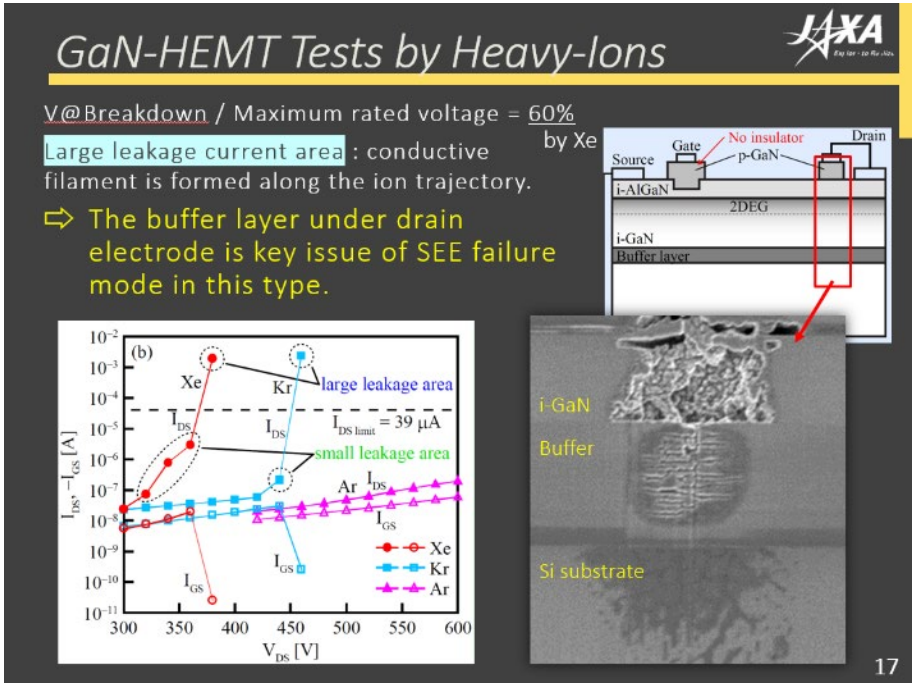


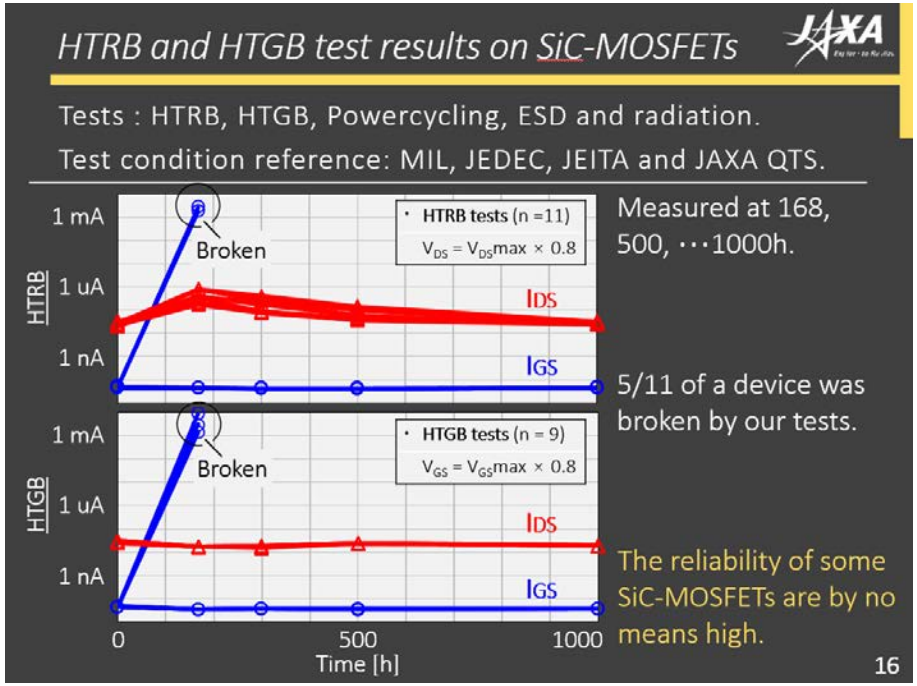

将来の大電力化・高耐圧化要求に応える技術（Siデバイスの特性限界を超える技術）として化合物半導体技術の適用が必要。

# 化合物半導体パワーデバイス技術の研究

## 化合物半導体パワーデバイス技術の研究

化合物半導体では、従来のSiデバイスでは見られなかった放射線破壊モードが観測されている。また、破壊に至る前のリーク電流の段階的な増加も観測され、この発生メカニズムの解明も必要である。メカニズム解明とともに、耐宇宙環境性がデバイス構造/材料の何に依存して決まるのかを明らかにする研究を進めている。




GaN-HEMTでの放射線破壊モード　　SiC-MOSFETの寿命評価

（MEWS30ワークショップJAXA報告資料より引用）

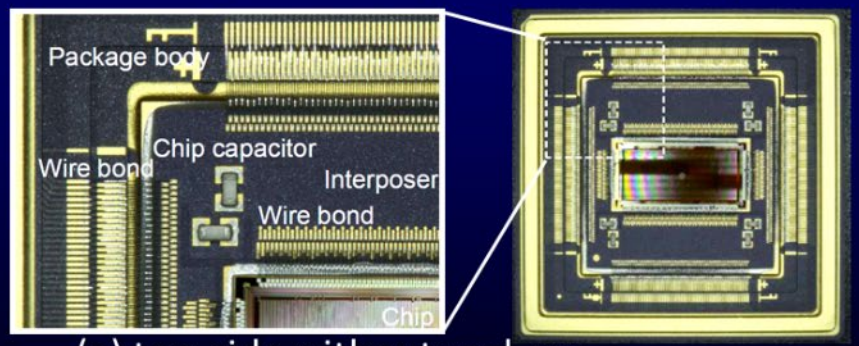
# 3. 技術課題とJAXA研究開発の取り組み

## ③ 先端電子部品技術の適用研究

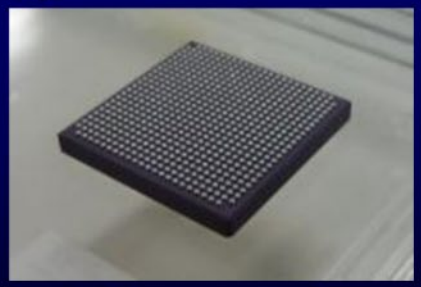
# 宇宙用小型BGAパッケージ開発

✓ 開発確認試験（二次実装信頼性） FY30末完了予定。

✓ Now in QT phase. (will be completed 2018)




(a) top-side without seal-cap



(b) bottom-side

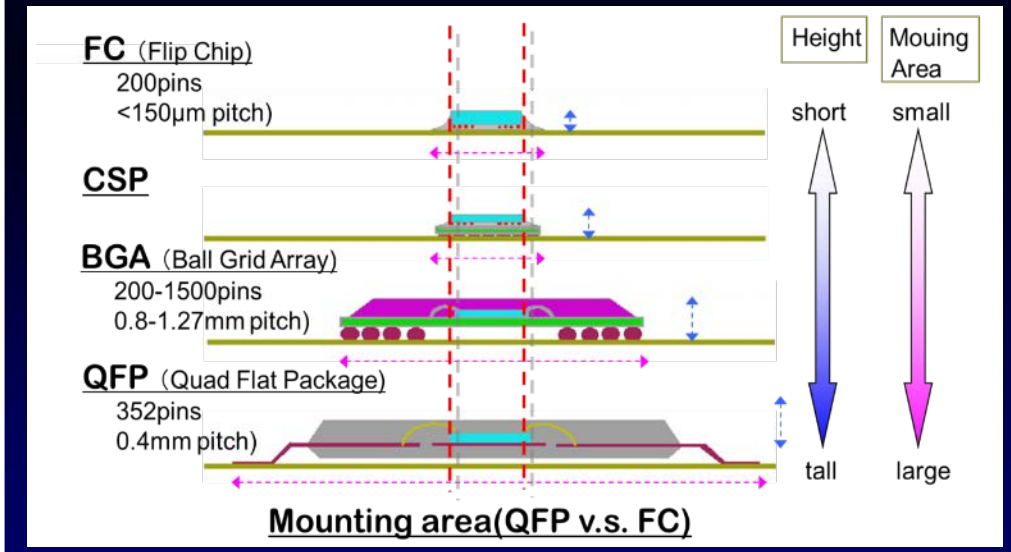
Target feature of C-BGA package

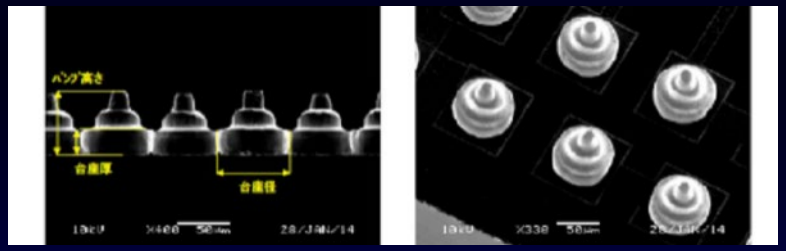
| | Target feature | Remark |
|---|---|---|
| TYPE | C-BGA | $Al_2O_3$ |
| Pin count | 572 / 357 / 165 | 24x24 / 19x19 / 13x13 (no corner-pins) |
| Pin pitch | 1.0 mm | |
| Pin material | Solder | 63Sn/37Pb and 10Sn/90Pb with a vacuum reflow |
| Internal Wiring | Al wire-bonding | conventional process |
| Mount tech. | BGA | with/without under-fill |

# 高密度実装技術の適用研究

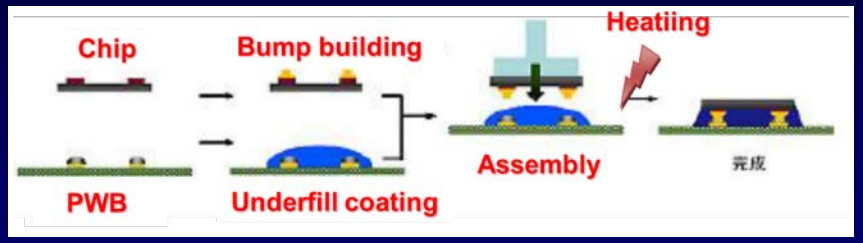
- ✓ JAXA is investigating System In a Package (SIP) technology for space devices with high-density Surface Mount Technology (SMT).
- ✓ Flip Chip(FC) would reduce CPU mounting area by 83.70%, which is expected to give a drastic miniaturization of space devices.
- ✓ Now element technology evaluations are on-going.

  *Build-up PWB for FC, Stud bump, Epoxy-encapsulated solder connection.*



Au Stud bump




http://www.panasonic.com/jp/company/pfsc/technology/dj200701.html

# 4. 重要度が増す故障解析技術・検査技術

LSI近傍磁界影響による誤動作解析

先端微細プロセスデバイスでの不良解析

※いずれも過去のJAXA経験からの例示

# 故障解析技術・検査技術の重要性

## 背景要因

- ✓ 衛星搭載機器のクロック動作速度レンジが、数10MHz～数100MHzオーダに高速化し、様々なノイズに対してセンシティブになりつつある。
（EMC、ESD（特にI/Oバッファ回路）、EOS etc.）

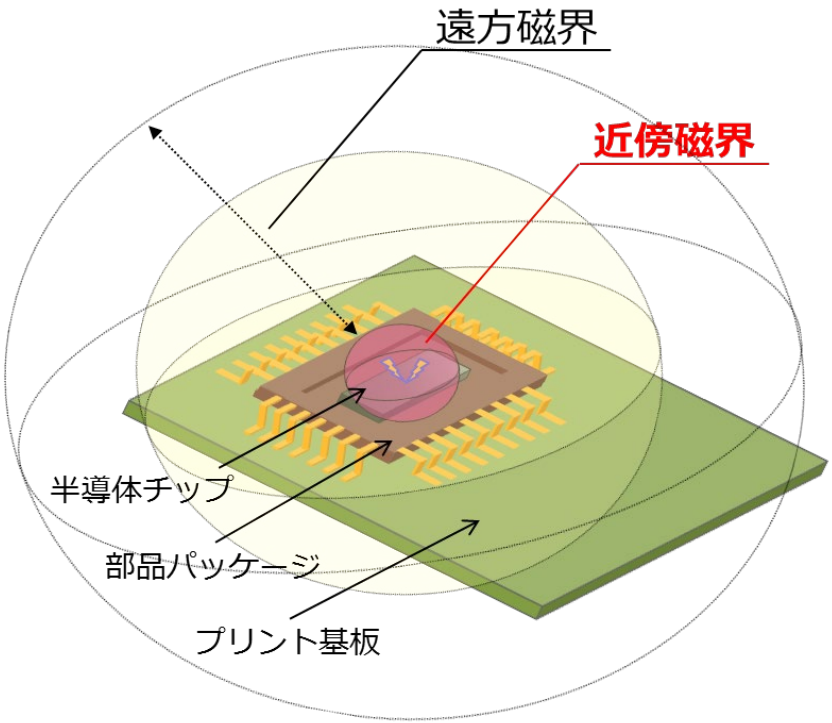
- ✓ 製造技術として、新しい材料や構造が使われるようになり、これらに対応して不良箇所と不良モードを的確に識別・推定できる解析技術が非常に重要。

- ✓ LSIが大規模化しているため、誤動作等の不良の発生条件が非常に複雑化してきており、事象を再現させ捉えること自体も高難度化。
（高い周波数レンジに同期しつつ ”その瞬間” を捉える解析技術が必要。）

- ✓ 識別された不良モードを確実にスクリーニングする検査技術も必要。
（不良品の市場流出を確実に防ぐ。）

# LSI動作時の近傍磁界影響

- LSIは、”電気信号”を情報として使用することで、データ処理や通信を行うため、自身の動作によって情報として不要なノイズが発生し、LSI自身に悪影響を及ぼすことが知られている(自己中毒)。
- LSIチップサイズは数mm～cm角程度であるため、特に重視すべきノイズ成分が「近傍磁界」に由来するノイズである。




近傍磁界由来のノイズに対する環境は、LSIの世代が進歩するにつれてより厳しい条件となる。
- 電源電圧の低電圧化
- 動作速度の向上
- 集積密度の向上

JAXA開発64bitMPU（HR5000S）においても、H/WとS/Wの組み合わせによっては近傍磁界起因と推定される誤動作が起きうることを確認。

（次ページに解析結果を示す。）

# JAXA開発HR5000Sの近傍磁界分布解析

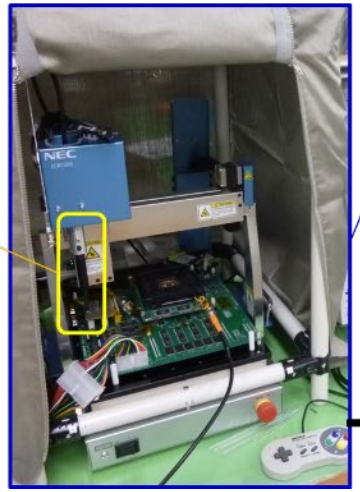
JAXA開発MPU HR5000Sで観測された近傍磁界起因のグリッジノイズ観測

magnetic-probe

Frequency range: 10M-3GHz

resolution: 0.25 mm

detector size: 2.0 mm x 1.0 mm



Scanning system

Spectrum analyzer

Operating PC

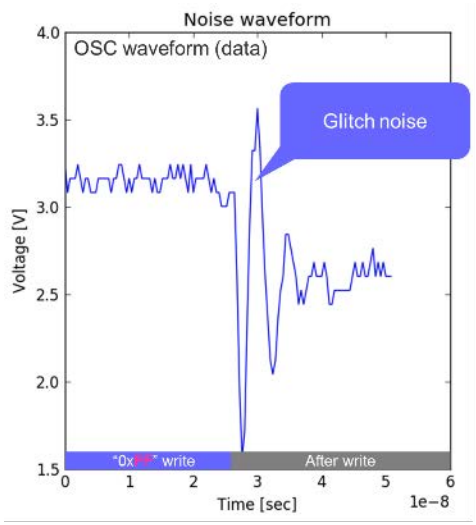



Fig. 9. Signal waveform of the data line on the Program A going.

FFT

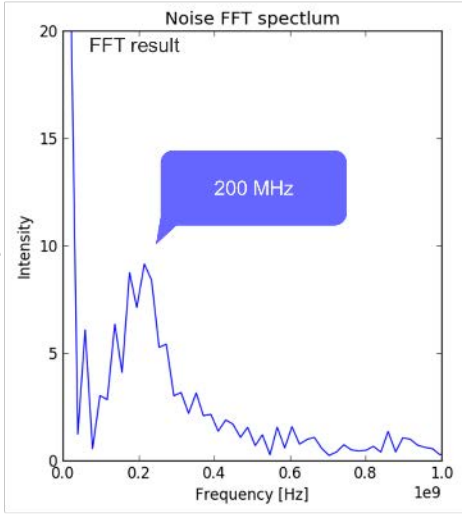
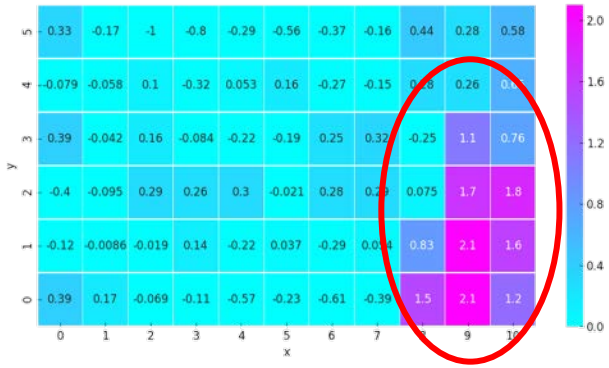



Fig. 10. Spectrum after FFT of glitch noise waveform.

磁界プローブを用いて磁界強度分布を測定
（5x10mmチップを1mmメッシュで測定）
この分析結果から原因回路を特定

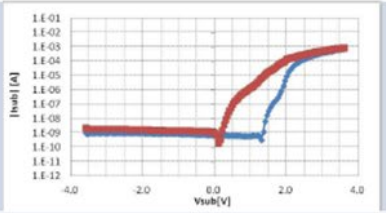



2D Distribution of noise intensity level

# SOIプロセスでのPID起因コンタクト形成不良

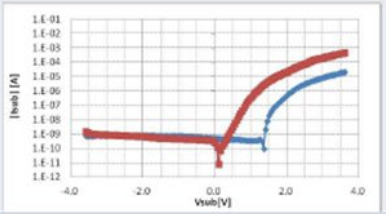
- ✓ SOIの形成過程において、プラズマ起因によるBOX酸化膜の破損や溶融が発生し、デバイスの機能不良やDC特性異常を引き起こしうることを識別。
- ✓ 発熱解析、IR-OBIRCH、ナノプローブを屈指し、不良コンタクト位置を特定。断面SEM像とI-V特性解析（下図）から本不良モードを同定。
- ✓ 基板バイアスをスイープさせると大電流が流れる特徴を利用した検査手法をJAXAで考案し、良品選別時に導入。出荷品に本不良が混入することを防止。

Mode 1



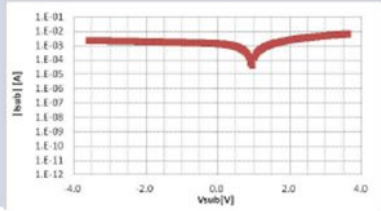

【BOX層破損モード1】
・PIDによりDrain/Source付近のBOX層が破損（溶解）
・基板との間に薄い酸化膜が存在
・破損（溶解）している箇所により、電流の立ち上がる電圧が異なる。

Mode 2

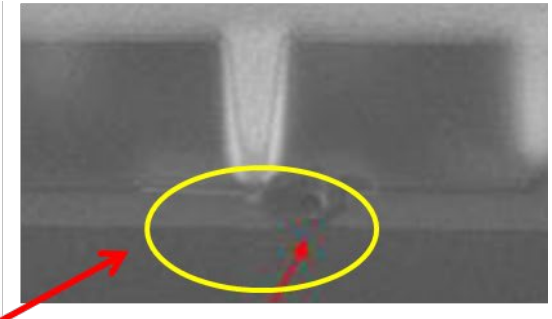


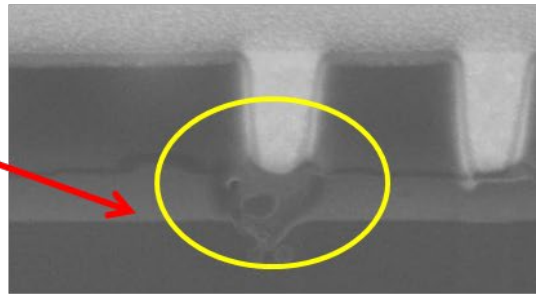

【BOX層破損モード2】
・PIDによりDrain/Source付近のBOX層が破損（溶解）
・基板とほぼ接触している（ショットキー接続に近い特性）
・破損（溶解）している箇所により、電流の立ち上がる電圧が異なる。

Mode 3




【BOX層破壊モード】
・PIDの影響によりBOX層が破壊（溶融）し、基板と接触したために電流値が増加。
・順方向-逆方向とも電流レベルが同じ（オーミックに近い特性）





# 5. まとめ

- 電子部品技術は日進月歩で技術進展が進む世界であり、宇宙用途でもこれまでに経験のない新材料や微細構造の適用が加速しつつある。

- 新たな技術に対応した、耐宇宙環境技術・信頼性評価技術・故障解析技術の獲得が非常に重要で、宇宙開発・宇宙利用に携わる産官学の英知を結集した研究開発の取り組みが求められる。