

TansaX セミナー

宇宙をめざすにあたっての参考情報
(システム構築と放射線)

宇宙探査イノベーションハブ
川崎 治

本日の構成

これまでの経験から民生から宇宙をめざすにあたって「これは知っておいたほうが良いかな」と感じてきた情報を一部ですがお話しします

- 自己紹介
- HTVで学んだパラダイムシフトの話
- 半導体デバイスと太陽電池の耐放射線性の話

自己紹介

経歴

- 1991.4 : JAXA(旧宇宙開発事業団)入社
- ~1994.3 : 種子島宇宙センター電気課 (射点・燃焼試験設備電気系)
- ~1997.1 : 研究開発部門 (当時、機器部品開発部) (太陽電池開発)
- ~1997.12 : 宇宙往還室 (システム?)
- ~2012.10 : HTVプロジェクトチーム (途中何回も名前が変わる) (システム・電気モジュール・電源系開発)
- ~2015.3 : 宇宙科学研究所 (はやぶさ2 電源系開発)
- ~2020.3 : 研究開発部門 (次世代MPU開発)
- ~現在 : 探査ハブ

今日はJAXAで最も長く過ごしたHTVでの経験 (特にNASA)
と太陽電池や半導体デバイスの耐放射線の話をしてします。

HTVで学んだ話（NASA調整を通じたパラダイムシフト）

HTV（宇宙ステーション補給機）

国際宇宙ステーション（ISS）リソースの日本利用分（12.8%）に応じた我が国のISS利用全体経費分担責任として食料・水などの物資や機材を輸送する日本の無人宇宙補給機。愛称「こうのとり」

1998年1月 基本設計開始

2009年9月11日 初号機打上

2020年5月の最終号機（HTV9）まで連続成功

有人施設に全自動で接近するロシア以外の無人機は世界初であり、人工衛星の設計・製作経験しかない日本の技術は数々のパラダイムシフトを経験



HTV2（2011年1月）

HTVで学んだ話（NASA調整を通じたパラダイムシフト）

有人施設であるISSへ接近するHTVにおいては、
万が一にも電力を喪失することは、ミッション達成上の影響以前に、
衝突防止などの安全上の観点で許容できない（当たり前）

電力系のパラダイムシフト

ミニマムリスク設計

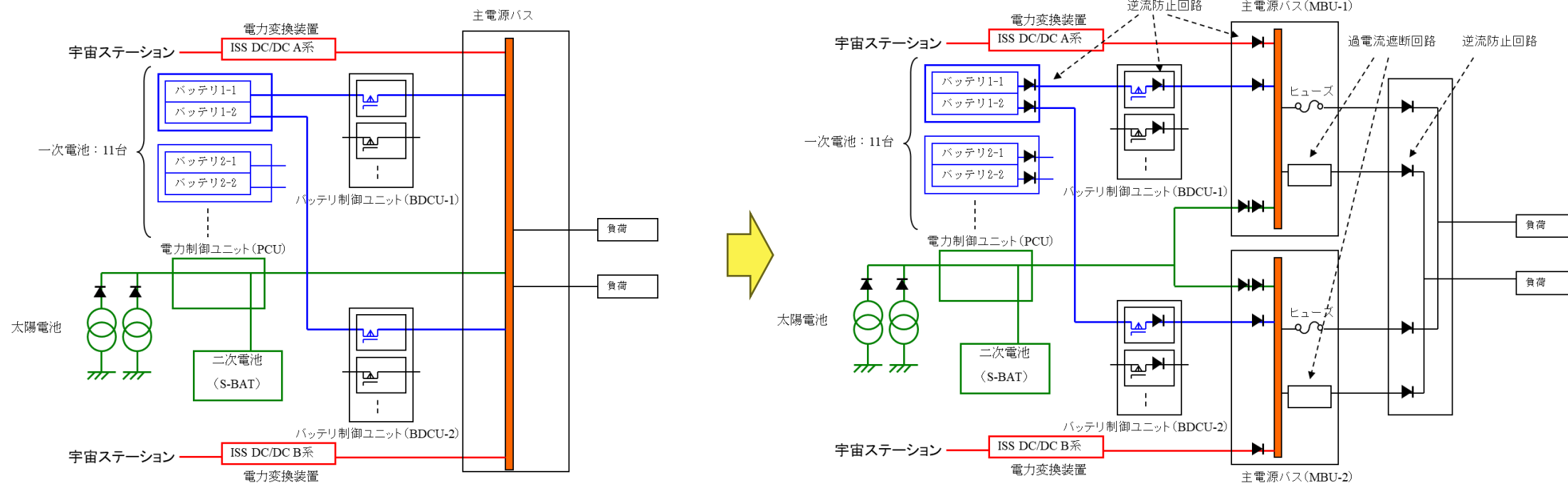
日本の宇宙機の電力系に適用されてきた
標準的な耐故障設計手法
耐故障性が十分に高いと検証された単系
の電力バスが負荷へ電力供給を行う



故障許容設計

バスの冗長化をはじめとしISSの共通要求
である1故障発生時においてもミッションを
達成し、2故障発生時においても確実に安全
にかかわる機能を維持する「Two-fail
Tolerant (2FT)」を実現

HTVで学んだ話（NASA調整を通じたパラダイムシフト）



世界に伍したはずの日本が20世紀最後の年に改めて学んだ話 ;
○「ミニマムリスク」は冗長のとれないところだからこそその「ミニマムリスク」
○パラダイムシフトの黒船はいつでもやってくる

ここからは「民生用部品を宇宙で用いる」にあたって知っておけば有用と思われるお話をいたします。

半導体デバイスと放射線

宇宙の放射線は、以下の3種類

(1) 銀河宇宙線：

超新星爆発等、太陽系の外から飛来する宇宙線で、エネルギーの高い重イオン等の粒子線とX線からなる

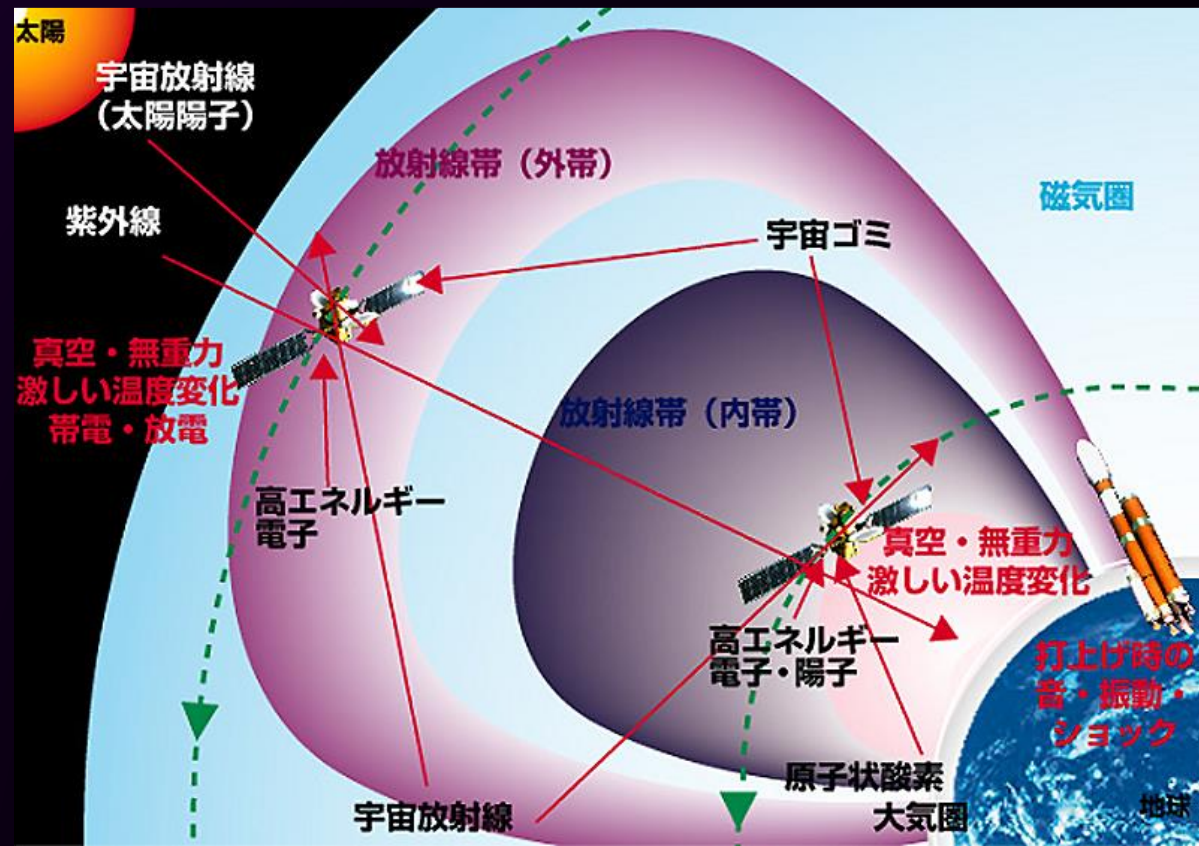
(2) 太陽宇宙線：

太陽から放出される電子や陽子による粒子線（エネルギーは様々）からなる

(3) 地磁気に捕捉された放射線：

太陽由来の電子や陽子からなり、地上500km～数千kmのバンアレン帯に存在。比較的低エネルギー

- 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必要（高信頼性）
- 半導体素子で最も重要なのは宇宙放射線への耐性であり、素子の高集積化に伴い深刻化（耐放射線性）



放射線劣化モードの種類

トータルドーズ効果

入射した全放射線の累積効果によって生ずる恒久的な損傷

■電離損傷(TID : Total Ionizing Dose)

放射線の入射で生ずる電離(電子・正孔対の生成)が半導体基板と酸化膜の界面に界面準位と、酸化膜中に正の固定電荷とを累積的に発生させることによる特性劣化

ICやトランジスタ

■変位損傷(DDD : Displacement Damage Dose)

入射した粒子が結晶格子の原子と衝突してはじき出し、格子欠陥を生ずることによる特性劣化

太陽電池やCCD

シングスイベント効果

たった1個の重粒子、陽子が電子部品に入射したことがきっかけとなつて特性劣化や永久破壊に至る現象

■SEU(Single Event Upset)

粒子の入射により二次的に発生する電荷量が、メモリのビット当たりの情報保持に必要な電荷量を超えてビット反転が起きる現象 "0"→"1"

■SEL(Single Event Latch-up)

粒子の入射によりオン状態のまま制御不能になり、電流が流れ続ける現象

トランジスタ
(メモリやロジック回路)

■SET(Single Event Transient)

粒子の入射により回路信号に過渡的な電圧変化(パルス)が生じる現象

■SEGR(Single Event Gate Rupture)

粒子の入射によりゲート酸化膜(絶縁膜)が通電し焼損する現象

トランジスタ
(パワーデバイス)

■SEB(Single Event Burnout)

粒子の入射により焼損する現象

トータルドーズ効果のイメージ

電子、荷電粒子(主に陽子)の入射



電子正孔対が発生
(一部の正孔は界面付近に移動)

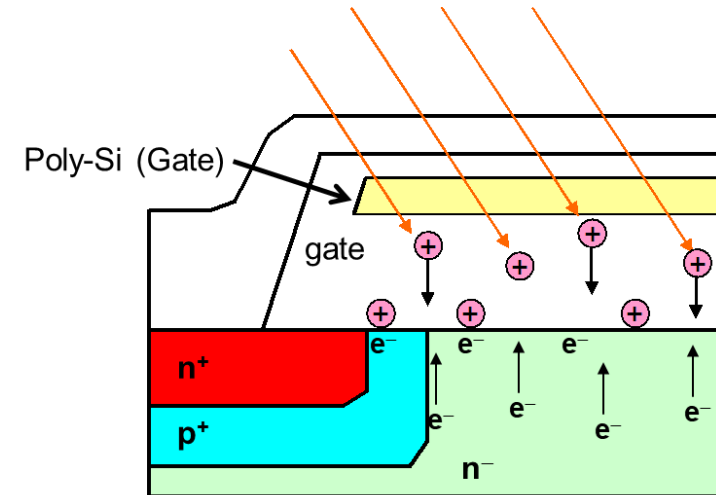


固定電荷と界面準位を生成

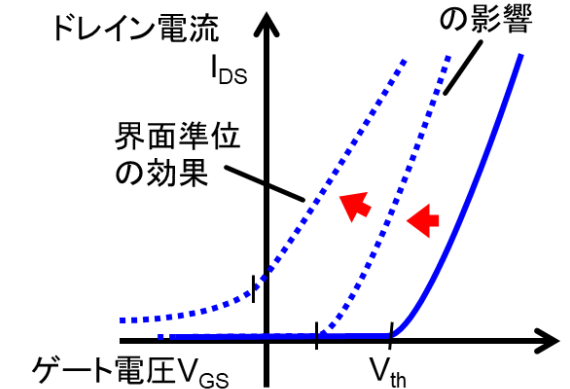


V_{th} 、 R_{on} 等の特性が徐々に変動

- ・n型、p型いずれでも発生
- ・n型ではしきい値電圧 V_{th} が小さい側に変動
- ・p型ではしきい値電圧 V_{th} が大きい側に変動



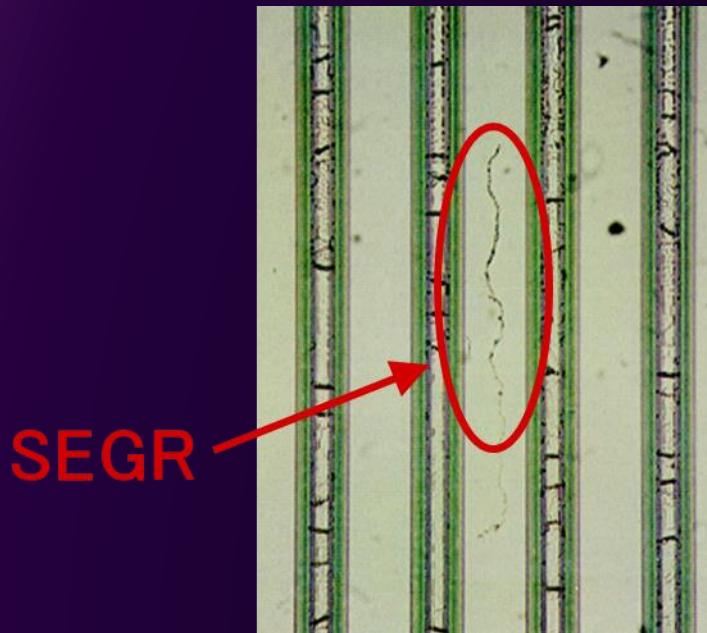
n型の V_{th} 変動の例



パワーデバイス破壊の例

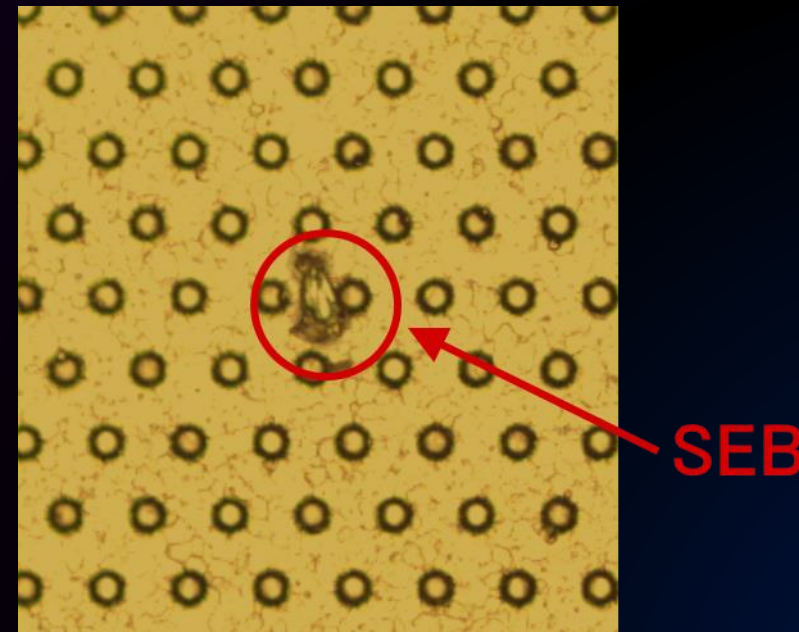
SEGR(Single Event Gate Rupture)

粒子の入射によりゲート酸化膜(絶縁膜)が通電し焼損

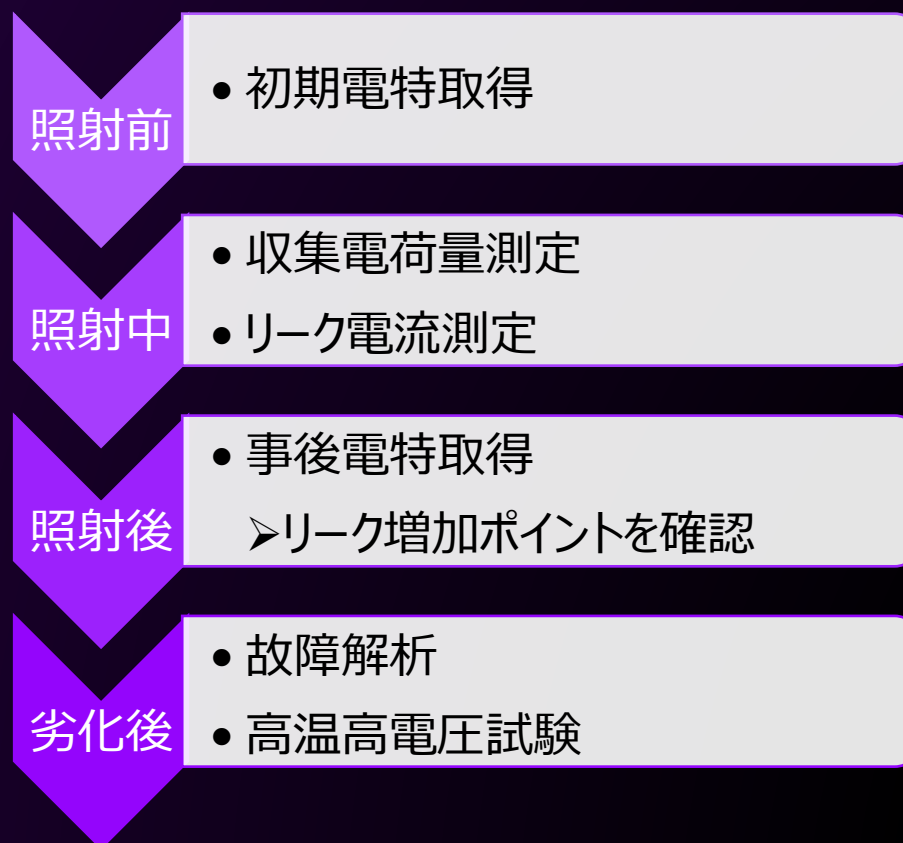


SEB(Single Event Burnout)

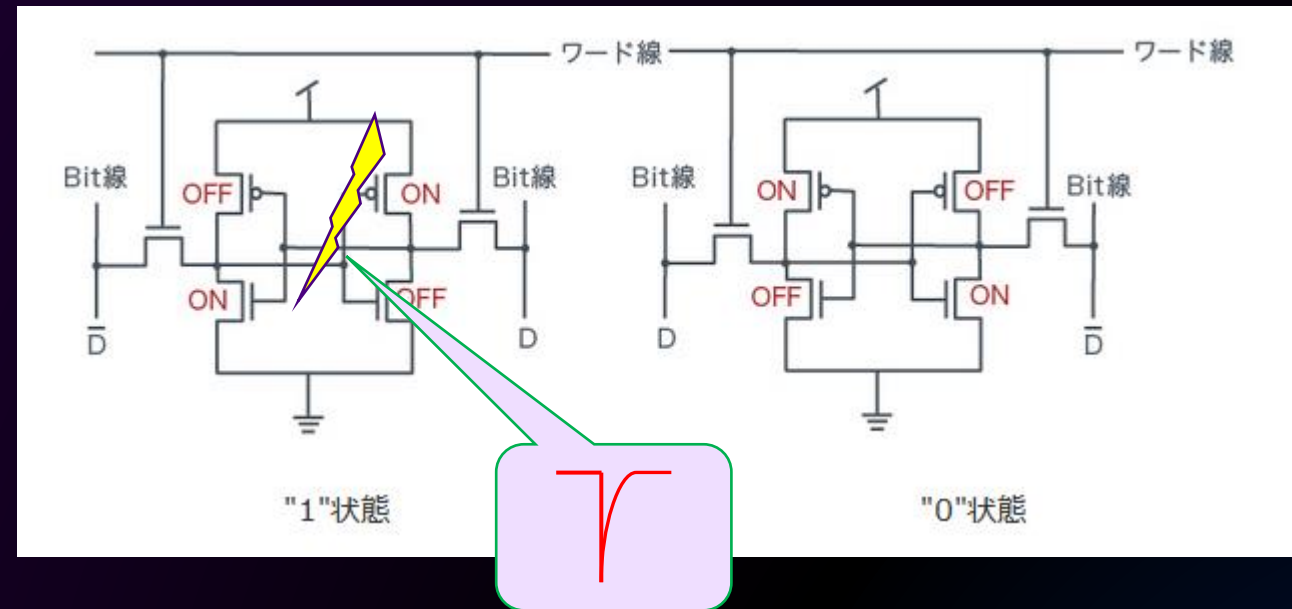
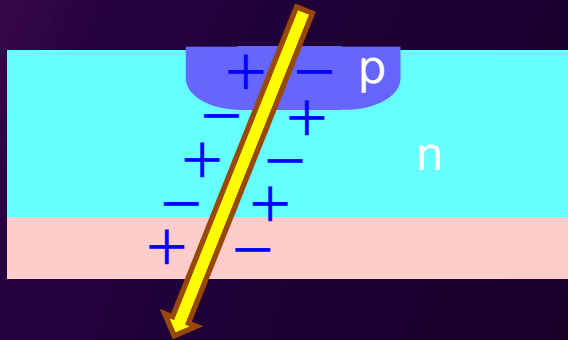
粒子の入射により破壊



パワーデバイスの放射線照射試験の流れの例

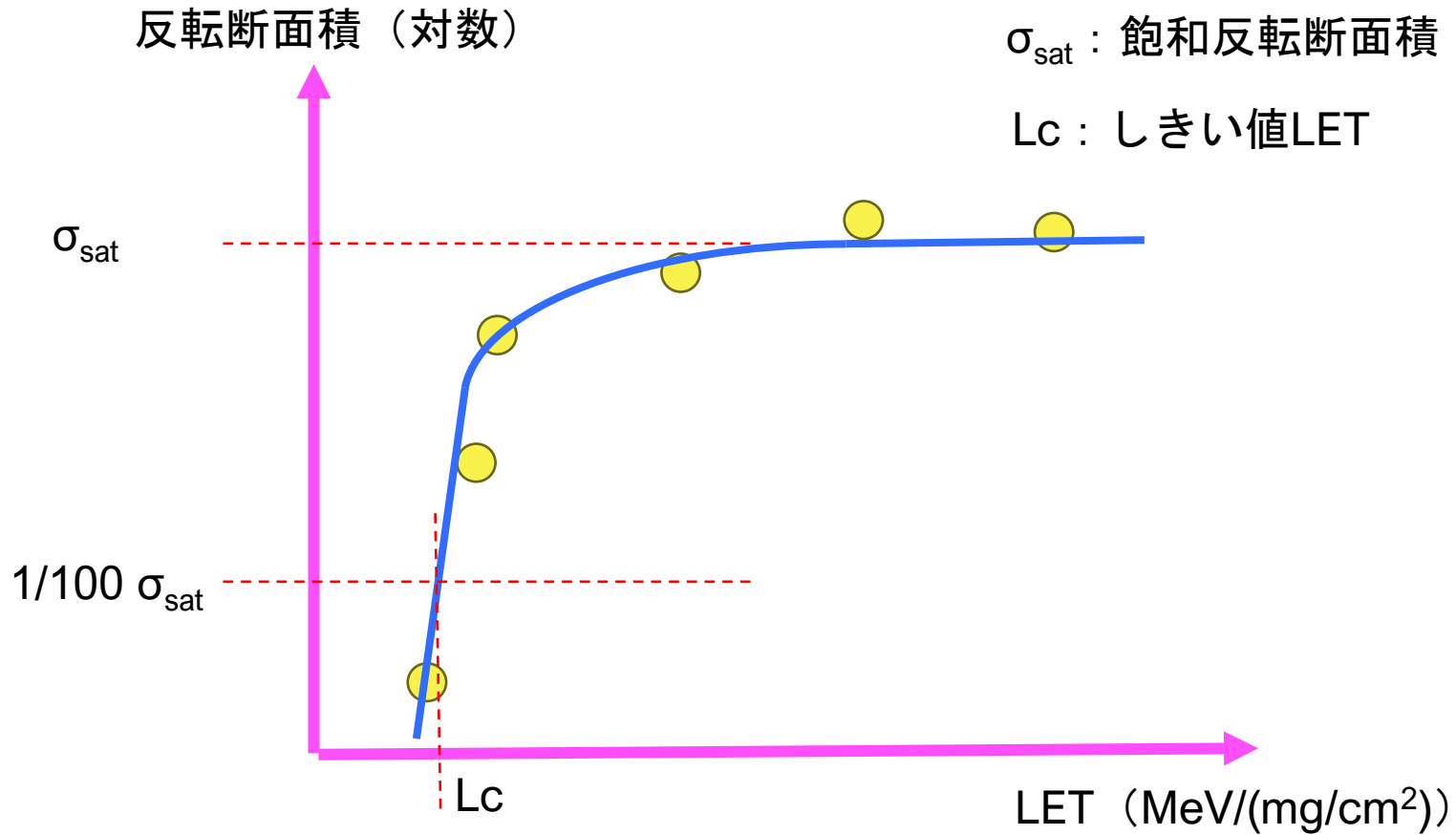


SRAM回路を例としたSEU/SET発生 の原理



- この現象の起こる確率はイオンの種類により異なり、イオンの線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer : LET) が大きい場合 (一般的に重い粒子) に高くなり、ある値以下 (しきい値) では発生しない
- このしきい値は半導体素子やデバイスによって異なる

しきい値の実験からの算定方法



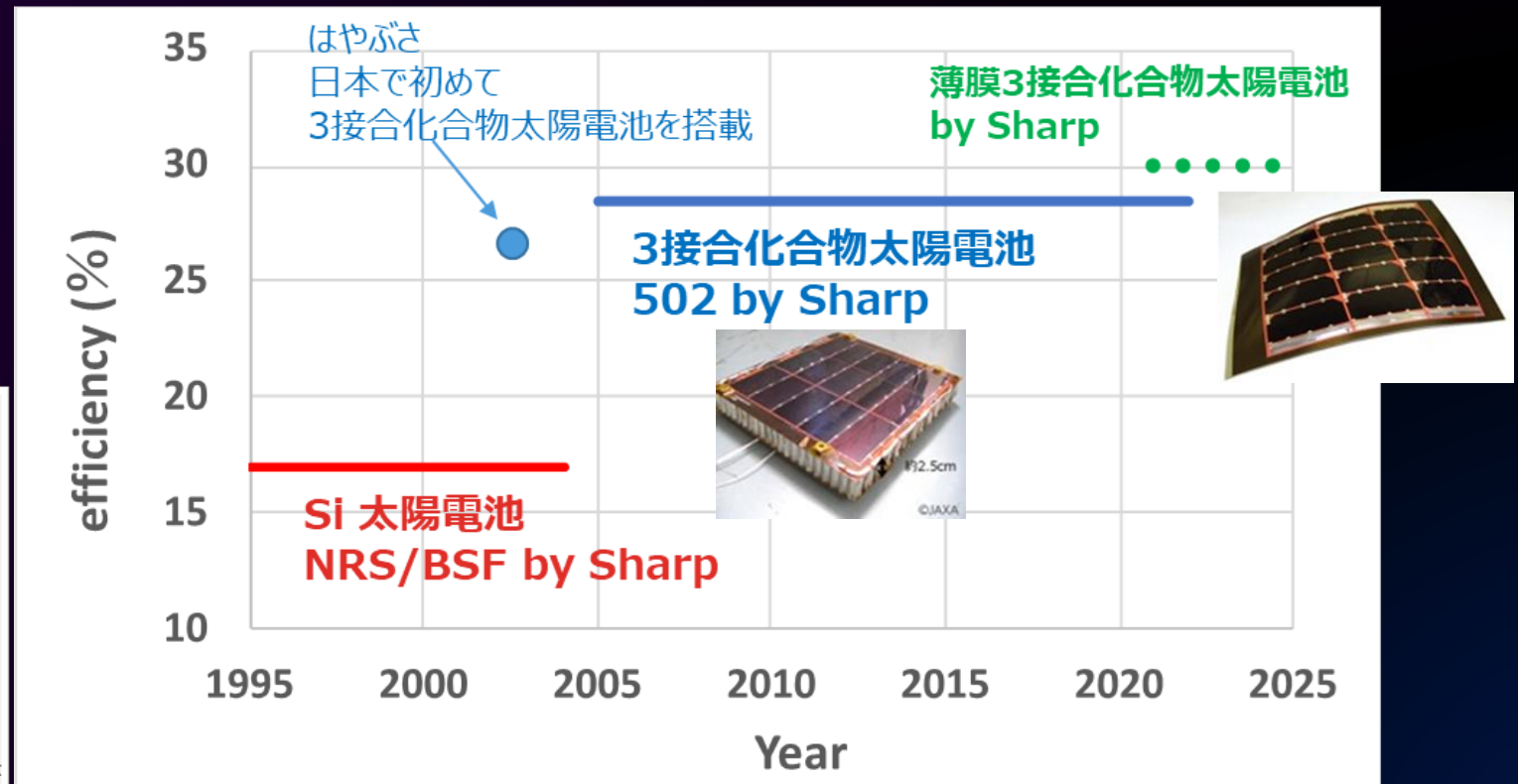
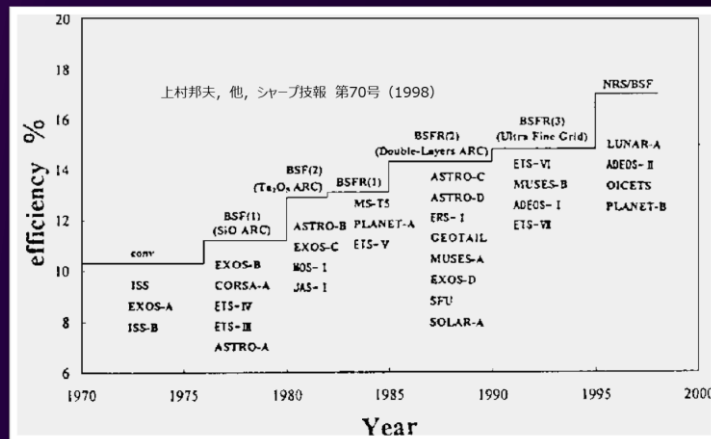
当然ながら、しきい値は高く、反転断面積が小さいデバイスのほうがエラーが少ない

典型的な宇宙用部品の放射線以外の試験項目

	項目	手法	使用機器	保有先
電気的特性	パラメータ測定	I-V, C-V	半導体パラメータ測定器 カーブトレーサ	JAXA
信頼性試験	寿命評価	バーンイン試験	恒温槽	JAXA
	熱衝撃試験	温度サイクル試験	熱衝撃試験装置	JAXA
	衝撃試験	衝撃試験	衝撃試験装置	JAXA
	振動試験	振動試験	振動試験装置	JAXA
故障解析	故障部位(リーク箇所)特定	エミッション解析	PEM	JAXA
		IR-OBIRC解析	IR-OBIRC	---
	チップ表面観察	マクロ, OM	実体顕微鏡 デジタルマイクロスコープ 光学顕微鏡	JAXA
	チップ表面観察	SEM	SEM (簡易)	JAXA
	界層解析	ドライエッチング (SiN膜) SEM	RIE SEM (簡易)	JAXA
	積層構造観察	断面OM 断面SEM	SEM (簡易)	JAXA
	結晶欠陥観察	断面TEM	FIB TEM	---
	結晶欠陥観察	平面TEM	イオンミリング TEM	---
構造解析	キャリア分布測定	SCM	SPM	---

ここからは、宇宙用太陽電池の歴史と研究中のペロブスカイト太陽電池のお話をいたします。

- ・ ~1990年代 : シリコン太陽電池の高性能化
- ・ 1990年ごろ~ : 化合物太陽電池技術の登場
- ・ 2000年代~現在 : 3接合化合物太陽電池が宇宙用太陽電池の主流
- ・ 2020年ごろ~ : 薄膜3接合化合物太陽電池の登場

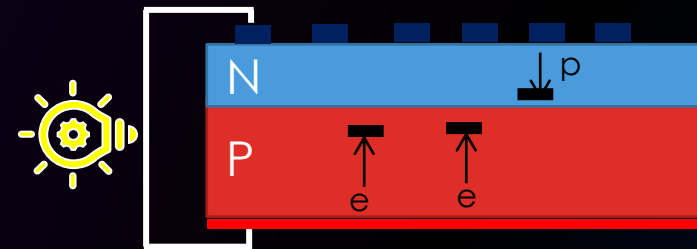


太陽電池の放射線劣化メカニズム

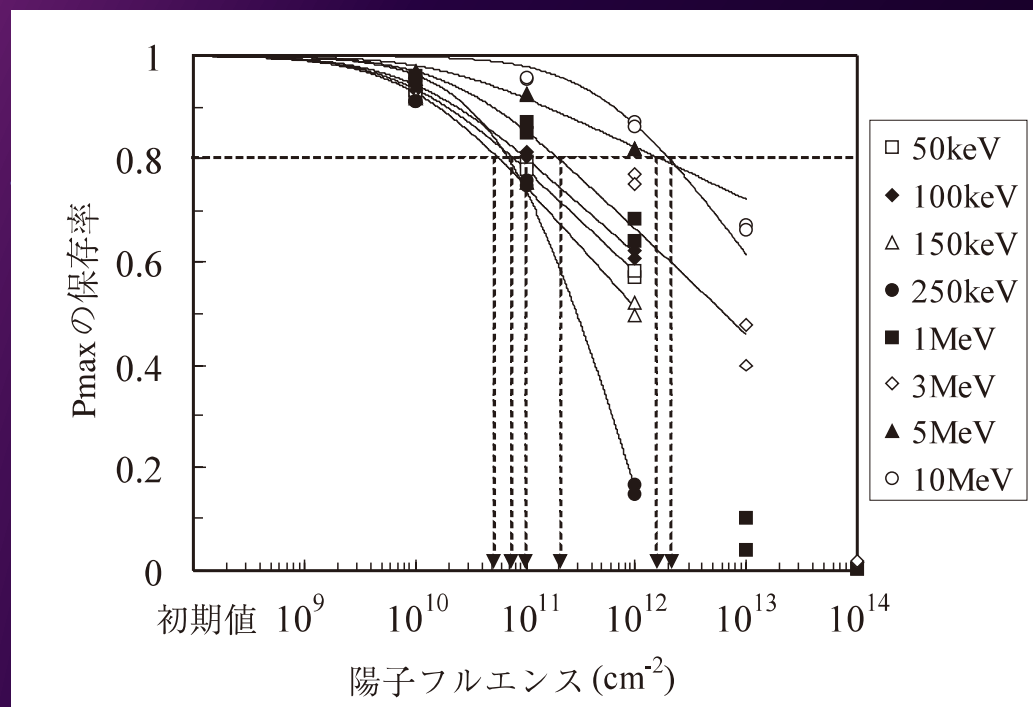
例えば、今泉充, isotope News, 2013年12月号 No.716.

キャリア寿命（特に少数キャリア）・拡散長の低下

1. 太陽電池材料である半導体結晶構成原子が、放射線粒子が与えるエネルギーによって格子点からはじき出される
2. 格子欠陥や空格子などの一次欠陥が形成
3. 一次、または二次欠陥（1次欠陥の後の欠陥反応を経て形成）が少数キャリア再結合中心として働く
4. 少数キャリア寿命・拡散長の低下
5. 出力が低下



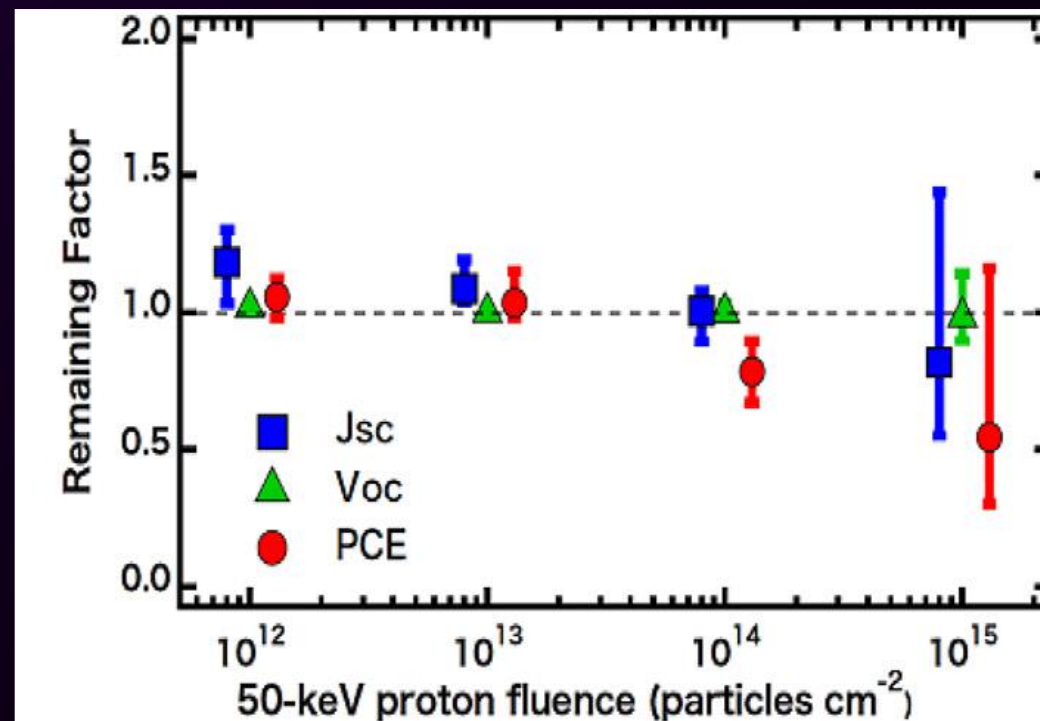
3接合化合物太陽電池とペロブスカイト太陽電池の陽子劣化の比較



今泉充, isotope News, 2013年12月号 No.716.

3接合化合物太陽電池の放射線劣化特性

最も劣化を与えるエネルギー250keVで
最大発生電力 (Pmax) が
 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ で初期値の20%以下に劣化



ペロブスカイト太陽電池の放射線劣化特性

最も劣化を与えるエネルギー50keVで
最大発生電力 (Pmax) が
 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ まで劣化せず

ペロブスカイト太陽電池の高い耐放射線耐性については欠陥導入の観点から研究中

まとめ

- 新しいものを作るときは当たり前と思っていたパラダイムもシフトする
できれば「黒船」により変わるのではなく自らクレバーに変わりたい
- 宇宙開発利用の商業化に伴い、放射線環境に対し民生用部品は
求める信頼性に応じて「そこそこ」使えればいいはず。
そして、そこそこ使えるものもある。
ただし、使うものがどのようにどの程度放射線に弱いのかは知っておく
必要が、おそらくある

いずれも探査ハブの研究につながっています

○
ご清聴
ありがとうございました
