



K Y O T O  
INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY

地上・宇宙向け高信頼集積回路とその実応用に向けた取り組み

学振158委員会講演より一部改訂

2016年12月13日

京都工芸繊維大学

工芸科学研究科

電子システム工学専攻

小林和淑, 古田潤

# 講演内容

- **信頼性一般**
- 一時故障(ソフトエラー)とは？
- ソフトエラーの実例紹介
- スーパーコンピュータの信頼性
- ソフトエラーの実測方法
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- 宇宙応用に向けて
- まとめ

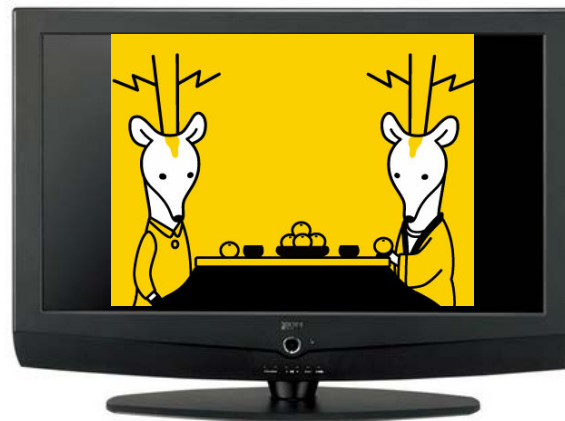
# 集積回路の用途



タブレット・スマホ・  
携帯電話



デジカメ



デジタルテレビ



白物家電



自動車

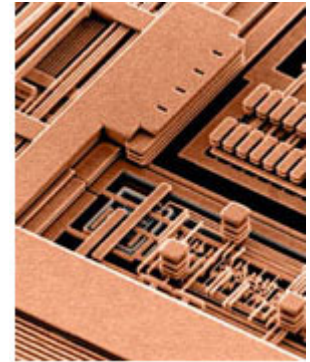


ロボット

- 電気で動くものほとんどに集積回路が搭載

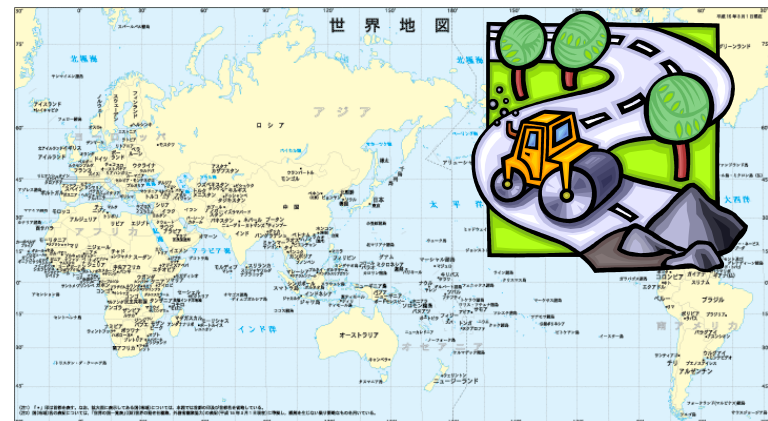
# ナノスケールの巨大さと信頼性

- 10mm角に最小14nmのパタンを書くのは、アジア大陸に9mの道路を9m間隔で書くのとほぼ同じ
- さらにLSIは多層配線(立体交差道路)
- このような**微細で巨大な**システムの信頼性を担保しなければならない。



250nm LSIの配線

	mm	um	nm
チップ面積	$(10,000,000)^2$		
最小配線幅		14	
	km		m
アジア大陸面積	$(6,600,000)^2$		
道路の幅			9

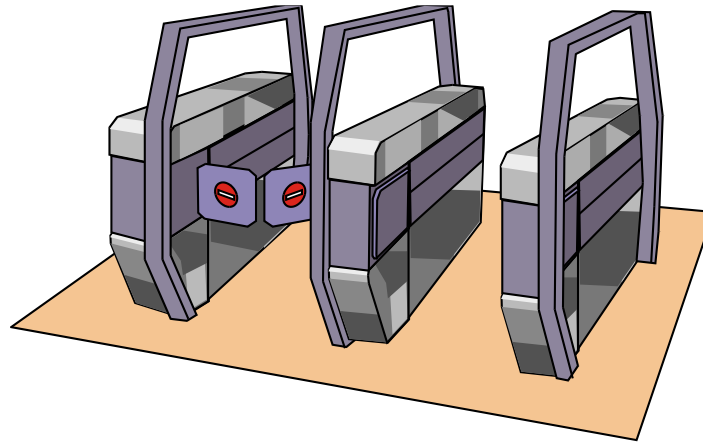


# 信頼性の低下が引き起こす問題

- 日常生活は、LSIを使った電子機器に大きく依存



交通



銀行

- トラブルの影響大



世界で50機  
(日本で25機)  
が運行停止

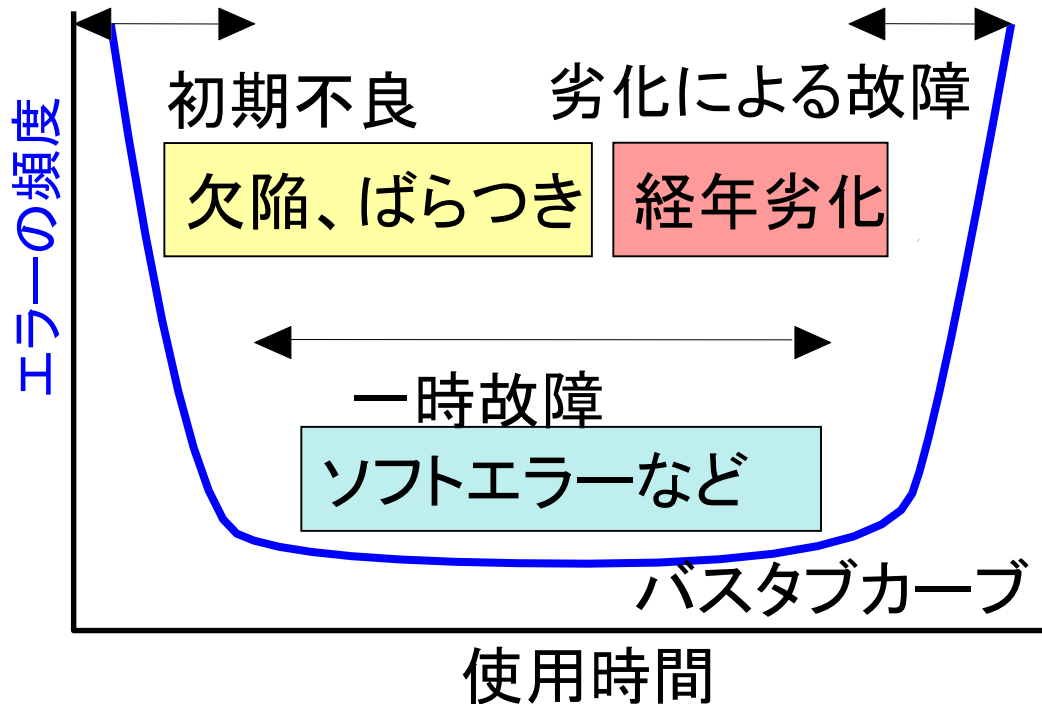
2013年1月 ボーイング 787 バッテリトラブル



4.8万人に影響. ネットワークSWのLSIが故障原因

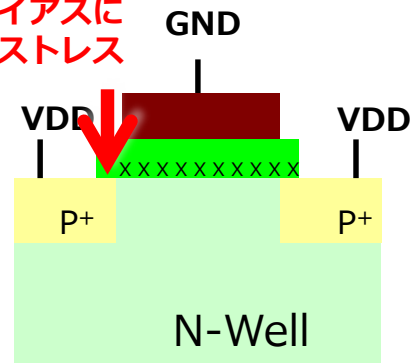
2016年3月 ANA 予約システムダウン

# 微細化による信頼性の低下



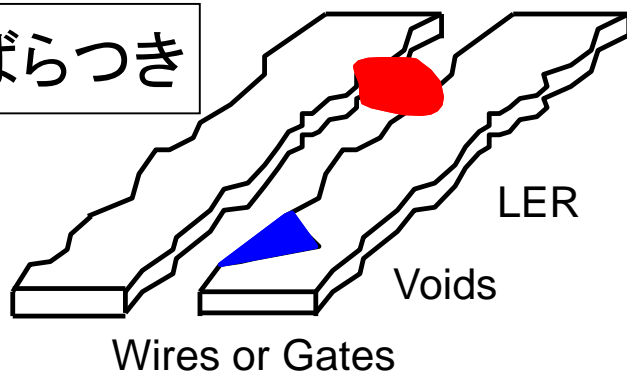
## 経年劣化 (BTI)

負バイアスによるストレス



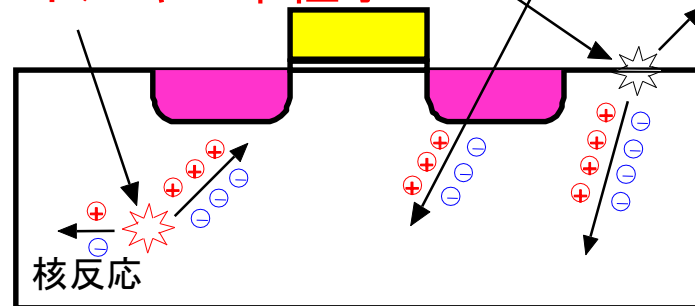
## 一時故障 (ソフトエラー)

欠陥、ばらつき



熱中性子 アルファ線

高エネルギー中性子



# 自動車安全規格



## ■ ISO26262

- FIT(10<sup>9</sup>時間あたりの故障数)

無対策だと数万FIT/Chip

Level	FIT rate	Objective
ASIL-A	< 1000	For convenience (Rear-camera)
ASIL-B, C	<100	For safety (Break assistance, Dashboard display)
ASIL-D	<1	For automatic driving (Google Car, Tesla)

## ■ 自動車向け半導体大手

- ルネサスエレクトロニクス(トヨタ, 日産, ホンダ)
- ボッシュ(欧州車)

## ■ ルネサスは**1ppm(1/100万)**の故障率を実現

- システムとLSIのワークショップ2016の講演より

# 集積回路の大規模化



印刷スライド  
P11

- 微細化によりチップあたりのトランジスタ数が増加
    - ムーアの法則に従い、1年半で2倍に
    - 性能や用途が増加している
  - スパコンは高性能化によりCPU数が大幅に増加
    - 地球シミュレータ(2002年) 1,280CPU, 0.13PF
    - 京コンピュータ(2012年) 88,128CPU, 11.28PF
- 全トランジスタが正常動作することが求められる



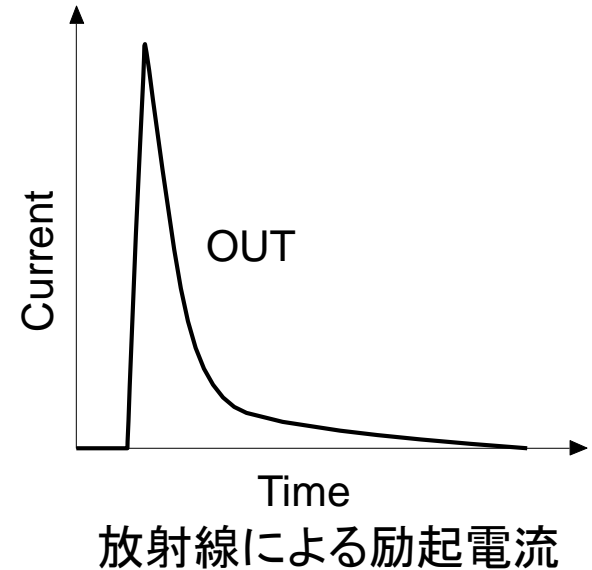
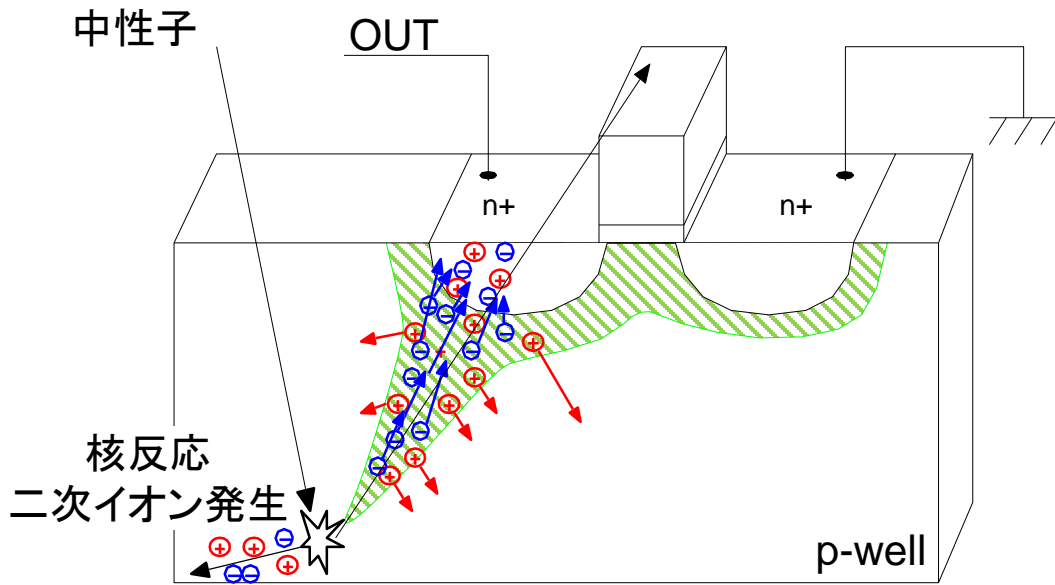
# 講演内容

- 信頼性一般
- **一時故障(ソフトウェア)とは？**
- ソフトエラーの実例紹介
- スーパーコンピュータの信頼性
- ソフトエラーの実測方法
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- 宇宙応用に向けて
- まとめ

# 一時故障とは？

- 内乱/外乱要因による一時的な故障
  - 電源を入れ直せば元に戻る ⇔ 永久故障
- 内乱要因
  - 内部動作によるノイズ(クロストークノイズなど)
  - 電圧ドロップによるタイミング違反
- 外乱要因
  - ソフトエラー ⇔ ハードエラー: 永久故障
    - 粒子線による一過性の現象(Single Event)による SEE: Single Event Effect (シングルイベント効果)
    - ≠ ソフトウェアのエラー

# シングルイベント効果



- 放射線の電離効果により電子正孔対が発生
- トランジスタのドレイン領域に電荷が収集
  - ファネリング、ドリフト、拡散
- トランジスタの出力が一時的に反転
  - LSIの誤動作(ソフトウェア)の原因に

# 半導体を取り巻く放射線環境

銀河宇宙線

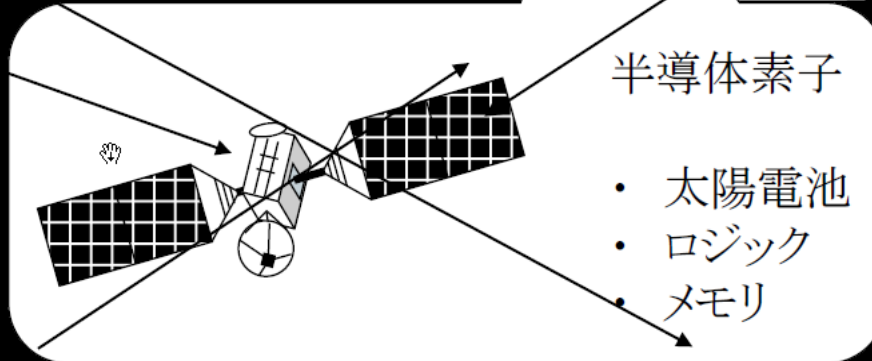
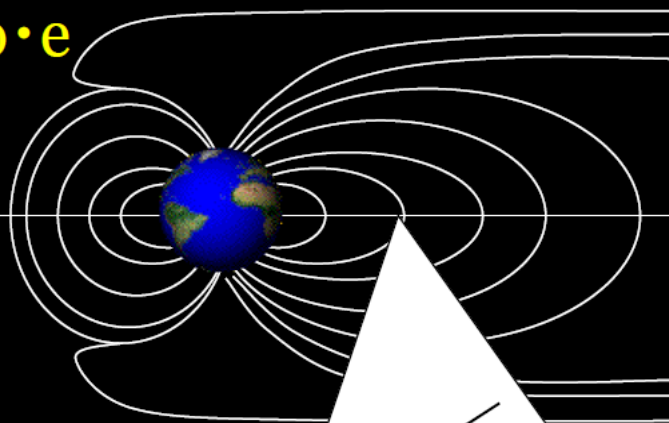
$p \cdot \alpha \cdot \text{ion}$

捕捉放射線

$p \cdot e$

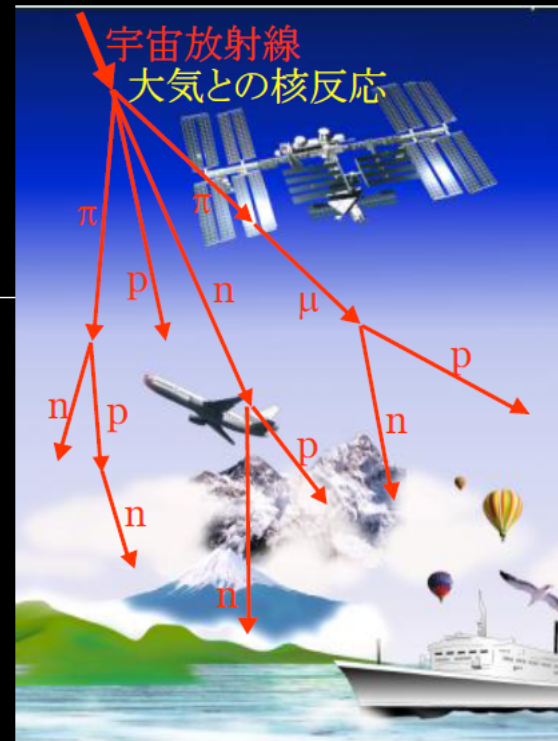
太陽フレア放射線

$p \cdot e \cdot \text{ion}$



半導体素子

- ・ 太陽電池
- ・ ロジック
- ・ メモリ



JAEA小野田氏スライドより

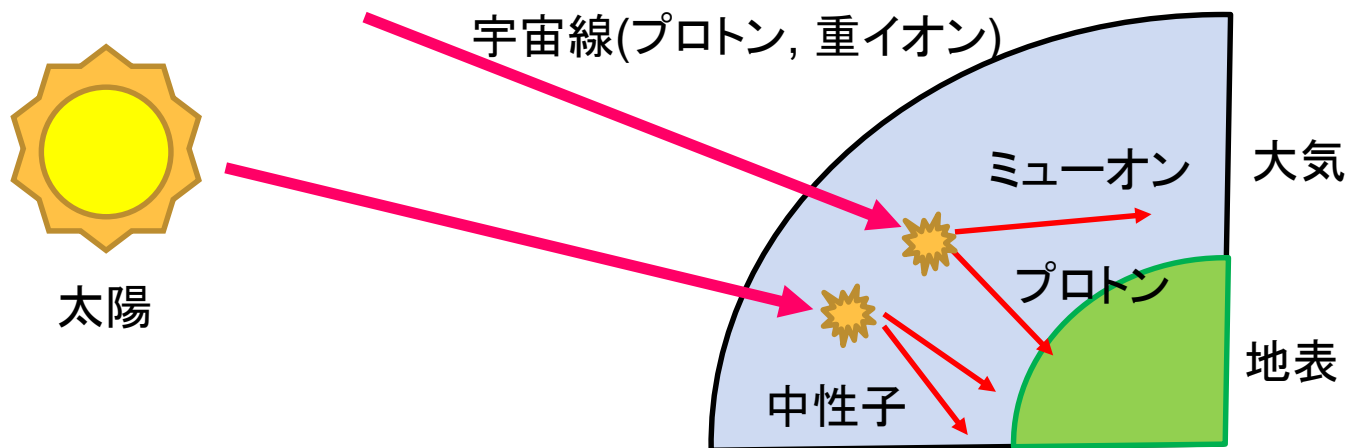
地上に生物がすめるのは大気が放射線を防いでいるから



# 放射線と集積回路

- 放射線は人体だけでなく、集積回路にも悪影響
  - 複数の影響が報告
- トータルドーズ効果 (Total Ionizing Dose Effect)
  - 多数の粒子が入射することで発生
  - 放射線によって生成された電荷がゲート酸化膜に蓄積し、トランジスタの特性が劣化
- シングルイベント効果 (Single Event Effect)
  - 1つの粒子が入射することで発生
  - 放射線の電離作用により生じた電子正孔対がトランジスタの出力を一時的に反転する = 回路の誤動作

# 地上でのソフトウェア



- 高エネルギー中性子が主要因
    - 宇宙線が大気と核反応して発生
    - 高度10km(飛行高度)では地表の100倍に相当
  - 材料の放射性不純物から放射されるアルファ線も一因
- ↓
- SRAM 1Mbitで約200年に1回SEUが発生
    - Intel core i7-6920HQ(キャッシュ8MB)なら4年に1回

# Fault, Error, Failureの定義

**Fault**

- Local transient (including SET)
- **Noise**
- Impact is not deterministic on device, circuit and system
- Generally difficult to monitor

**Error**

- SEU (Single Event Upset)
- **Data is flipped** in more than 1 memory elements
- Impact is not deterministic on circuit, system
- Detection and resumption are possible
- Nondestructive device level errors

**Failure**

- **Misoperation** of electronic system (Shut-down, abnormal operation, miscalculation)
- Final output of PCB
- Resumption is not possible without physical or economic damage in system (Reboot, re-configuration, etc)



- テニスに例えると
- **Fault**
  - ファーストサブミス
- **Error**
  - ダブルフォールト
- **Failure**
  - ゲームやセットを落とす

# SERを気にする分野と気にしない分野

## 気にしない

- 民生品
- チップは一つ
- クリティカルじゃない
- 携帯電話
- MP3プレーヤ
- 無線チップ

1 MFIT/chip ok  
(~1 error/month)

## とっても気になる

- 高い信頼性を要求する分野
- 複数のチップのシステム
- 命にかかわる分野
- 安全システム
- 医療用電子機器
- 自動車
- 飛行機

< 1000 FIT/Chip

Catalog  
DSP,  
MSP, etc.



# 講演内容

- 信頼性一般
- 一時故障(ソフトウェア)とは？
- **ソフトウェアの実例紹介**
- スーパーコンピュータの信頼性
- ソフトエラーの実測方法
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- 宇宙応用に向けて
- まとめ

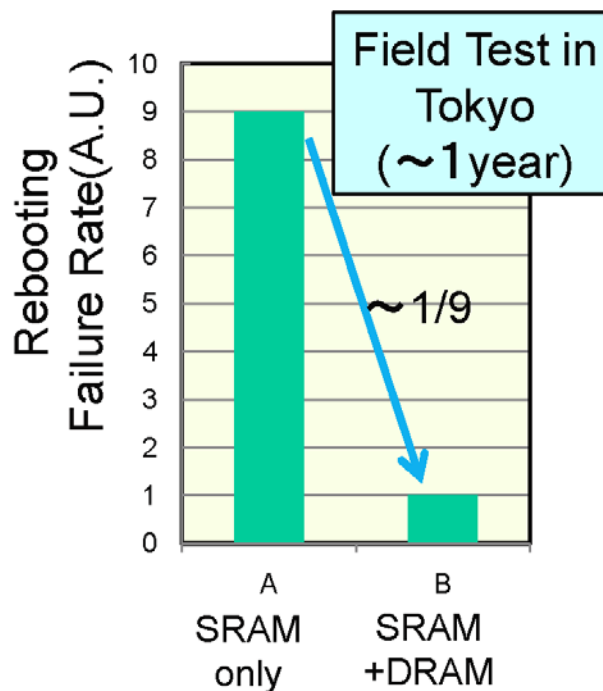
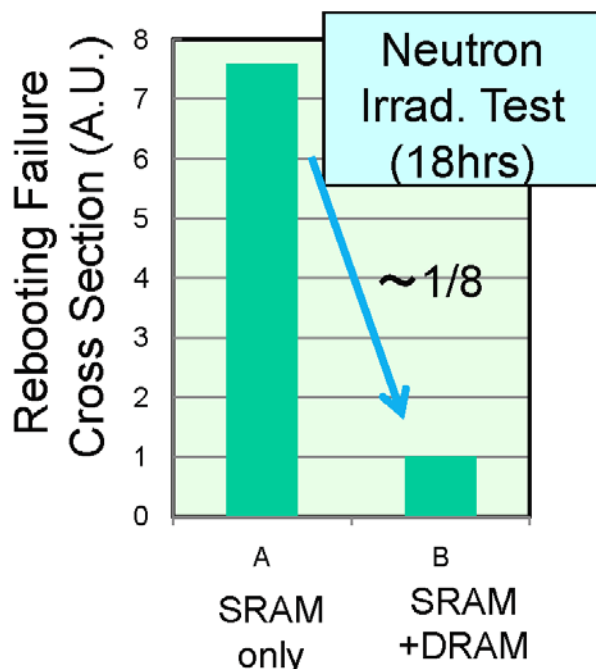
# ソフトウェアエラー？実体験

- **ハワイ行きの飛行機**
  - iPod touch (初代)の、ボリュームが誤動作
  - 再起動で復活
- **日本原子力機構(JAEA)の加速器見学時**
  - デジカメが誤動作
  - 何もできなくなる。電源OFFすらできない
  - バッテリーを抜いて対処
- **大阪大学核物理センター(RCNP)の休憩室**
  - プラズマテレビの画面半分がブラックアウト
  - 電源入れ直してもダメ？

# 実動機器における一例

- ソフトエラーに弱いSRAMを、DRAM+ECCに換えると、エラーは約1/10に

日常の一時故障の90%はソフトエラー



Shimbo,  
*SELSE7*  
(2011)

# ソフトウェアエラー問題：実害



EE Times:

## SRAM soft errors cause hard network problems

Anthony Cataldo [Anthony Cataldo](#)

[EE Times](#)

(08/17/2001 7:22 HCE EDT)

SAN MATEO, Calif. — Networking equipment is growing increasingly susceptible to soft errors — nonrecoverable, temporary misfires that can play havoc with things like traffic destinations — as chip



Sun CEO  
Scott McNealy  
[Forbes 2000]

金輪際IBM社のSRAMは購入しない!!!

- サーバ用メモリで生じたソフトウェアエラーによってシステムがクラッシュ
- たまたまソフトウェアエラーに脆弱だったIBM社のSRAMを使用
- **ソフトウェアは製品の信頼性を低下**

# 中性子線量の高度依存性

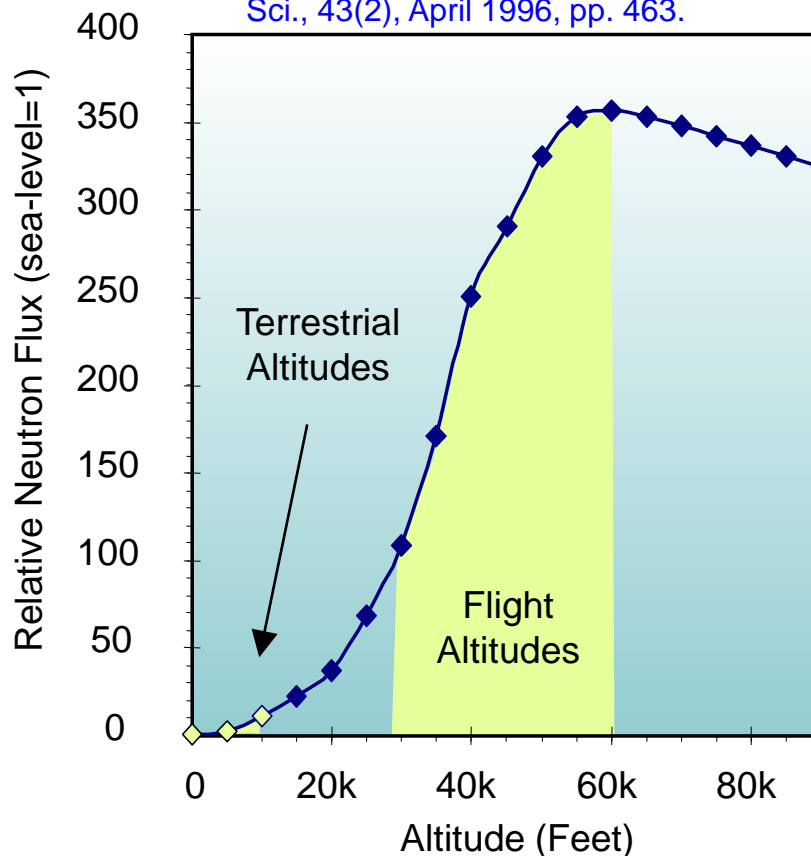
Pop. data from  
public World Bank  
and CIA  
Databases

Altitude		relative flux	% Urban Pop
feet	meters		
0	0	1.0	35%
1200	366	1.5	80%
1700	518	1.7	90%
3600	1097	2.4	95%
5000	1524	2.9	99%
10000	3048	11.4	>99.99%

高度3000mでは、放射線量は11倍

住環境

After Eugene Normand, "Single Event  
Effects in Avionics", IEEE Trans. Nucl.  
Sci., 43(2), April 1996, pp. 463.

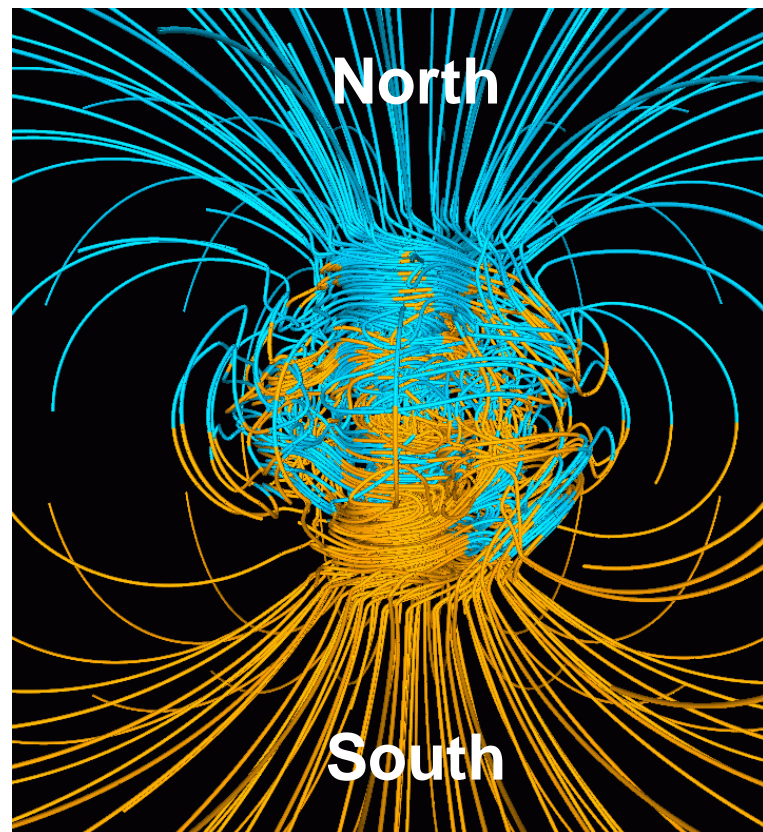
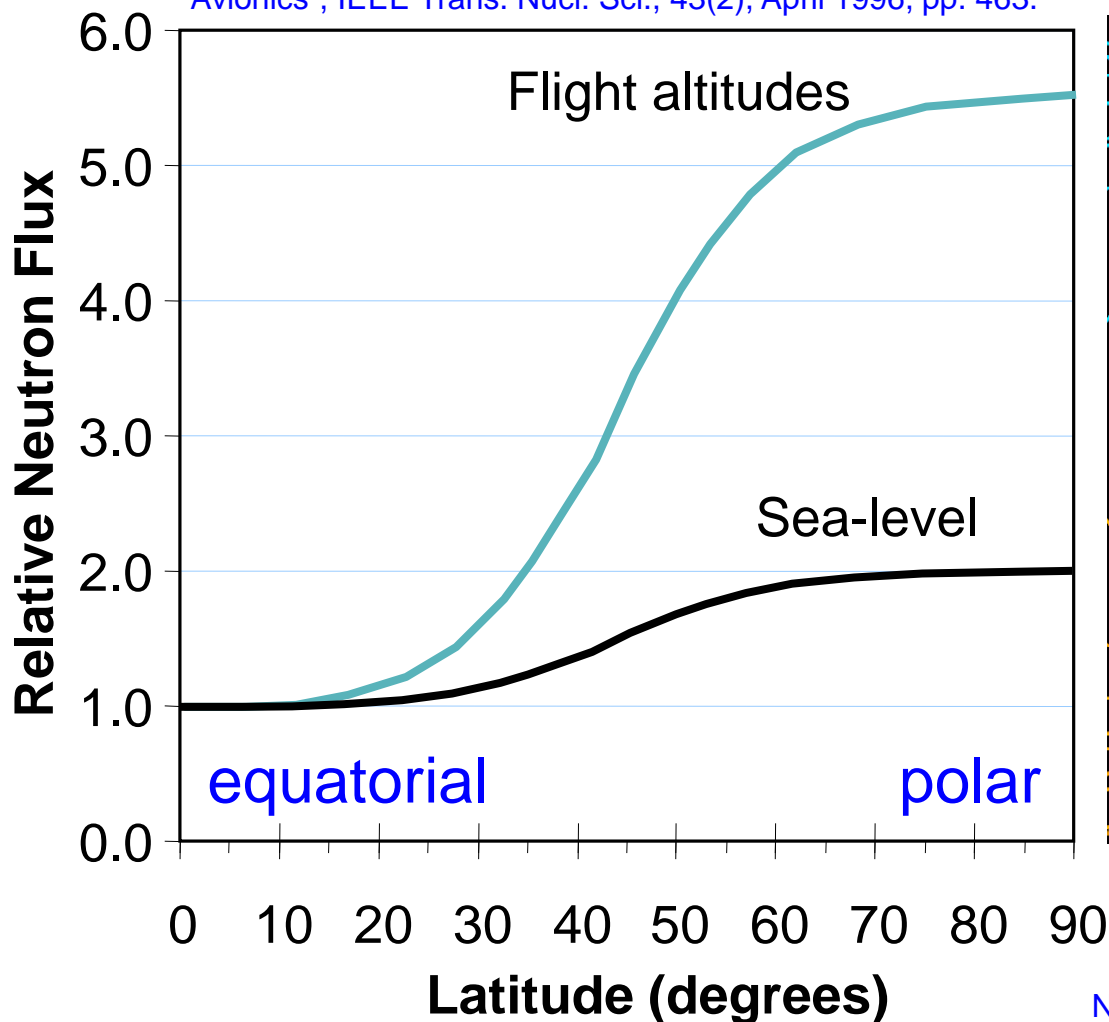


1万m(30kフィート)では、**100倍**

飛行中

# 緯度依存性(極は中性子量大)

Adapted from Eugene Normand, "Single Event Effects in Avionics", IEEE Trans. Nucl. Sci., 43(2), April 1996, pp. 463.

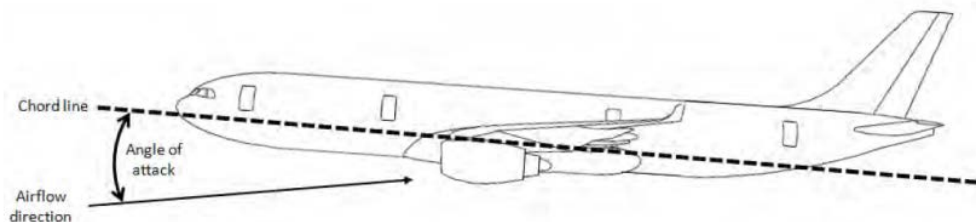


A computer simulation of Earth's magnetic field structure

NSF homepage. Research by G.A. Glatzmaier and P.H. Roberts, "Rotation and magnetism of Earth's inner core," Science, 274, 1887-1891 (1996).

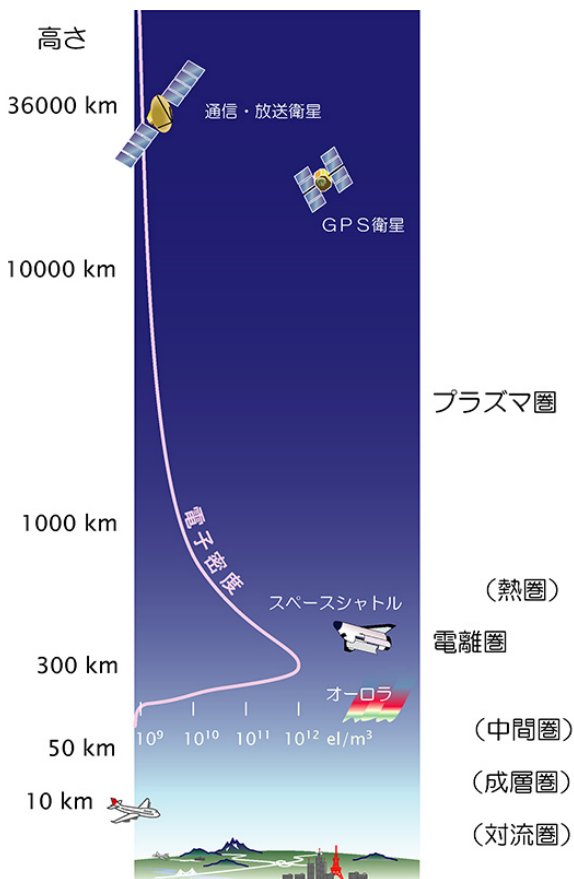
# 航空機への放射線の影響

Kobayashi Lab.



- フライバイワイヤの制御システム故障により急降下
  - 2008年10月Airbus A330
  - 1/3の乗客と3/4の乗員が怪我
- B787のバッテリートラブルもSEEかも
  - GSユアサは化学の会社で電子関係はよそから買ってきているだけ.

# 地上環境と宇宙環境



[http://aer.nict.go.jp/people/spe\\_yokoyama.html](http://aer.nict.go.jp/people/spe_yokoyama.html)

- 重イオンにより発生
  - 重イオンは通過すると必ず電子正孔対発生
  - 遮蔽困難
- 数が少なく損害大
- 少量の耐性を強靱に

宇宙

- $\alpha$ 線, 中性子により発生
  - $\alpha$ 線は低 $\alpha$ 材料で低減可
  - 中性子は間接的で遮蔽可
- 数が多い
- 大量の耐性を強靱に

地上

- 問題を起こすと大変. エアバッグは**3000億**

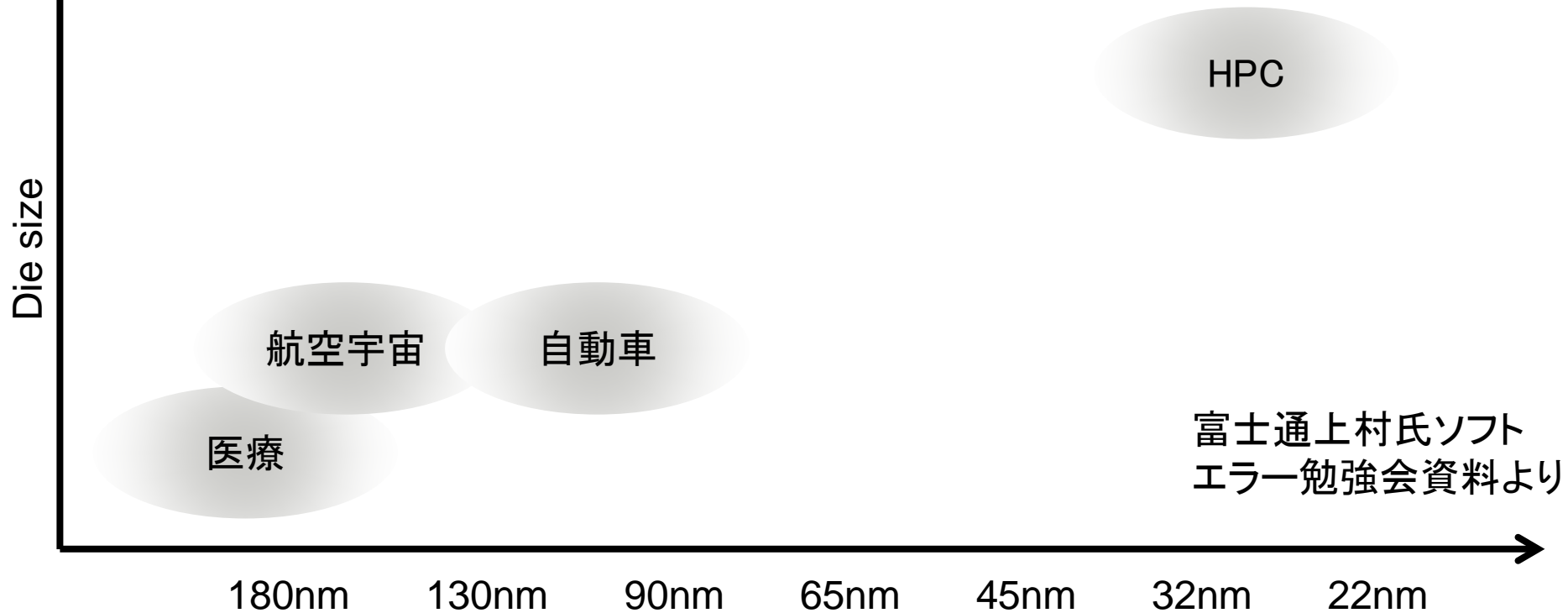


# 講演内容

- 信頼性一般
- 一時故障(ソフトエラー)とは？
- ソフトエラーの実例紹介
- **スーパーコンピュータの信頼性**
- ソフトエラーの実測方法
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- 宇宙応用に向けて
- まとめ

# 信頼性とプロセス・チップサイズ

Kobayashi Lab.



- 高信頼が求められる製品は、古いプロセス
  - 「90nm以降は怖くて使えない」トヨタの数年前の発言
- HPC(スパコン)向けデバイスだけが最先端プロセスかつ大規模

# スパコン京における信頼性

- CPUを8.8万個搭載
  - 普通のPCは多くても8個

1個のCPUが1年間故障0( $<0.1$ MFIT)としたMTBF(平均故障間隔)

CPU 8個なら、1か月以上動作

8.8万個なら **1年/88128台=約6分**

24時間稼働させるには、240年エラーの起こらないCPU( $<15$ FIT)が必要



# 京コンピュータとソフトウェア



「88,128個のCPU などから構成されるシステム全体が29時間28分にわたって無故障で動作したことは、世界最大級の超大規模システムの安定性を実証することになりました。」  
(理化学研究所:広報活動 2011/11/2)

- 京コンピュータではシングルイベントが**数十分に1回**発生
  - 京コンピュータ全体で4.4Tbit SRAMを利用しているため
  - 100倍の耐性または99%のエラー検出でようやく1日稼働

## ■ メモリ

- ECC: エラー訂正, やり直し

## ■ ラッチ, フリップフロップ

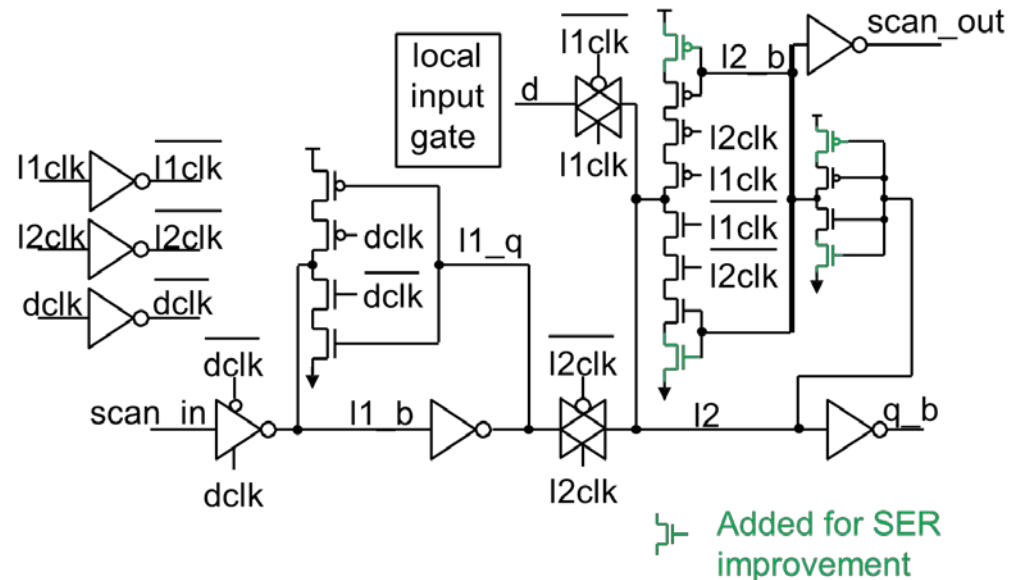
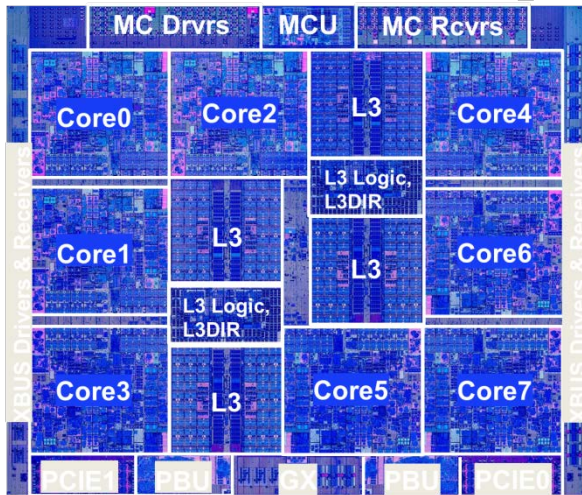
- パリティ: やり直し
- 多重化: エラー**隠蔽**

## ■ チェックポイント

- すべての状態を保存, エラーが起これるとそこ  
まで戻る

# HPC用プロセッサの対策[1]

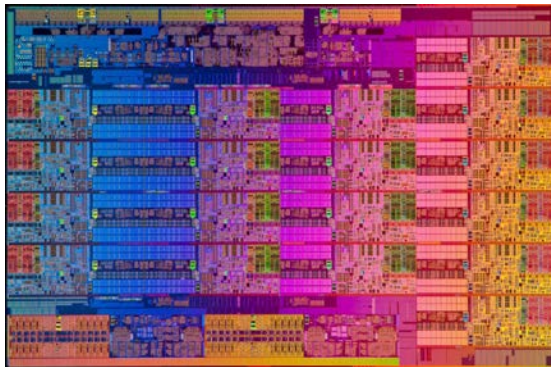
## ■ 22nm IBM System z Microprocessor [ISSCC15, 4.1]



- 8Coreの計算チップ
- ラッチに無駄なトランジスタを付加
- SOIプロセスはMOSFETをスタック(縦積)するとソフトウェアに強靱に

# HPC用プロセッサの対策[2]

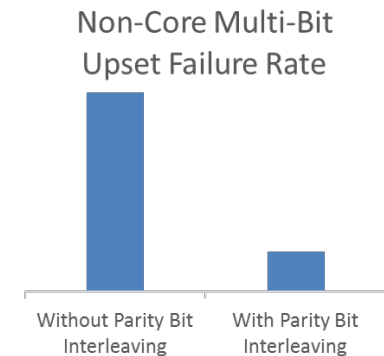
- Intel Xeon E5-2600 v3 ( 22nm 18 Core)  
[ISSCC15 4.5]



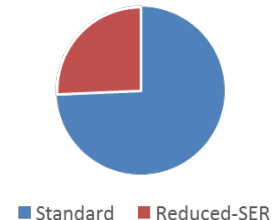
- 危ないレジスタファイルとSRAMにParityかECCを付加
- SERを1/4に

## Soft Error Rate

- Soft error resilience maintained despite increase in cores & logic
- Parity or ECC added to all critical register files & SRAMs
- Targeted usage of Reduced-SER state element topologies
  - Single Event Upset Tolerant topologies used on the most critical state, such as FIVR configuration



IO, Memory and Cache Controller State Elements



# 講演内容

- 信頼性一般
- 一時故障(ソフトエラー)とは？
- ソフトエラーの実例紹介
- スーパーコンピュータの信頼性
- **ソフトエラーの実測方法**
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- 宇宙応用に向けて
- まとめ



# ソフトウェア率の実測方法

## ■ フィールド試験

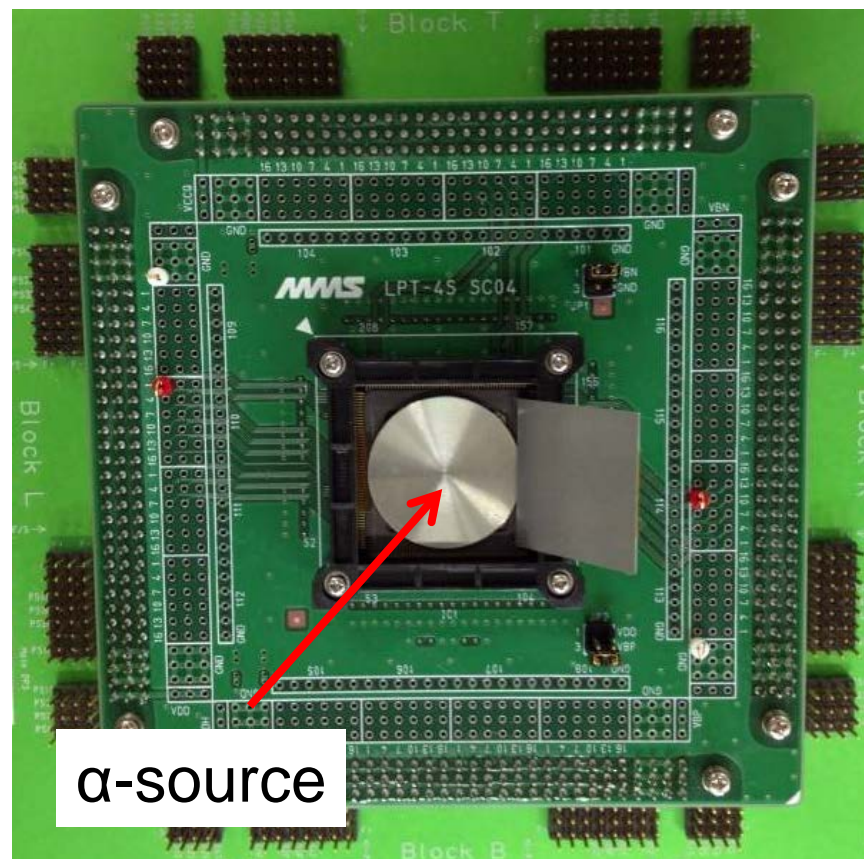
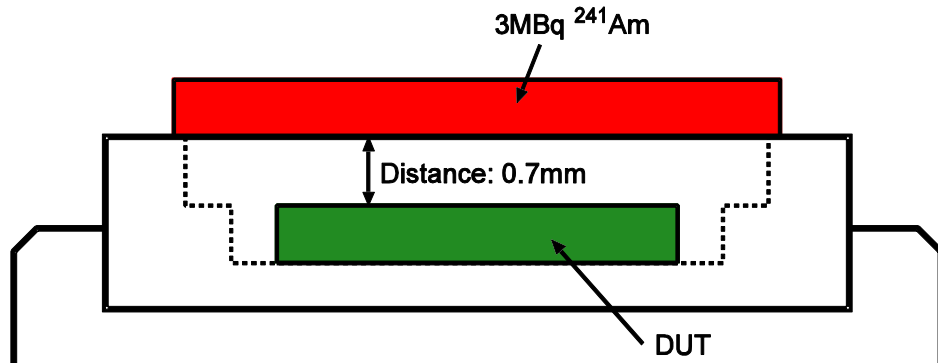
- 地上や高い山に多数のデバイスを並べてソフトウェア率を実測
- 実データが取れるが、時間と多数のデバイスが必要

## ■ 加速試験

- 粒子線のエラーを加速
- $\alpha$ 線: 取扱いが簡単、エネルギー小
- 中性子線: 要加速器、地上でのエラーを加速観察可能. 2次効果のため、エラー数少.
- 重イオン: 要加速器、チャンバーに入れる必要あり. エラーは多数観測可

# アルファ線照射試験

- $^{241}\text{Am}$  (測定機器校正用) をデバイス直上に
  - アルファ線は紙でも遮られるので、モールドパッケージでは測定不可能.
  - セラミックパッケージにて測定



アルファ線照射試験の様子 (真上から)

照射の模式図 (断面図)

# 中性子線による加速試験の概要

## ■ 白色中性子をチップに照射

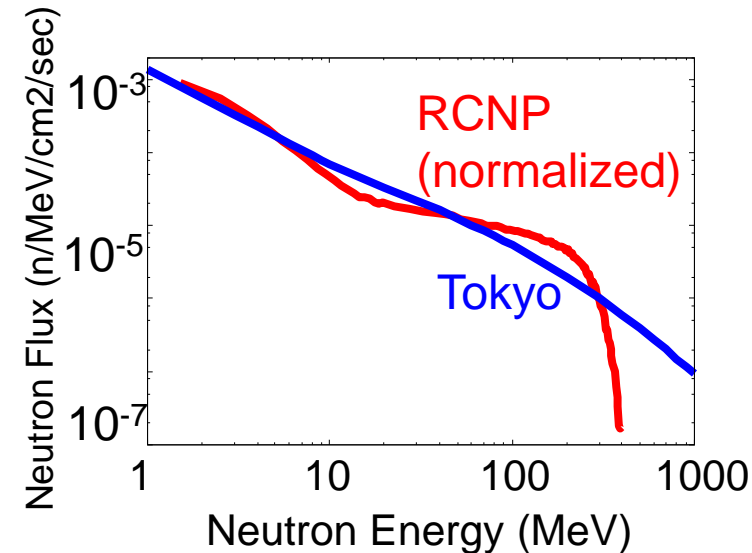
- 大阪大学RCNPの加速器を利用
- 1時間で10万年分
- 地上と同等のエネルギースペクトル



実使用環境でのソフトエラー率に  
近い値が得られる

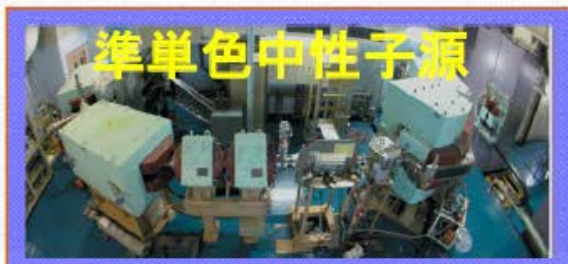
## ■ 加速試験での問題

- 発生個所を指定できない
- 測定回路の信頼性も重要
- 加速しても発生数が少ない

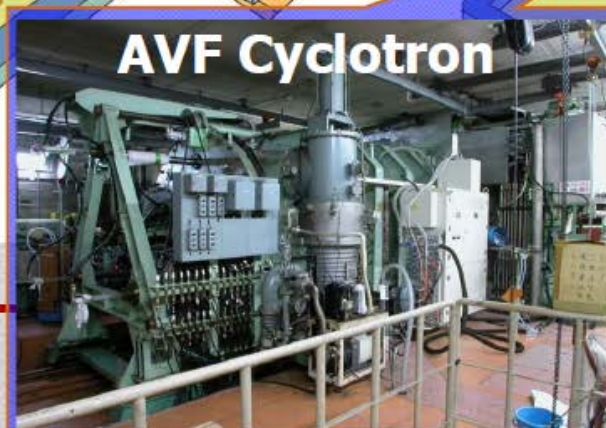


# RCNPサイクロトロン施設

RCNP福田先生資料よ



K=400 MeV  
 $\Delta E/E \sim 0.01\%$   
Since 1992



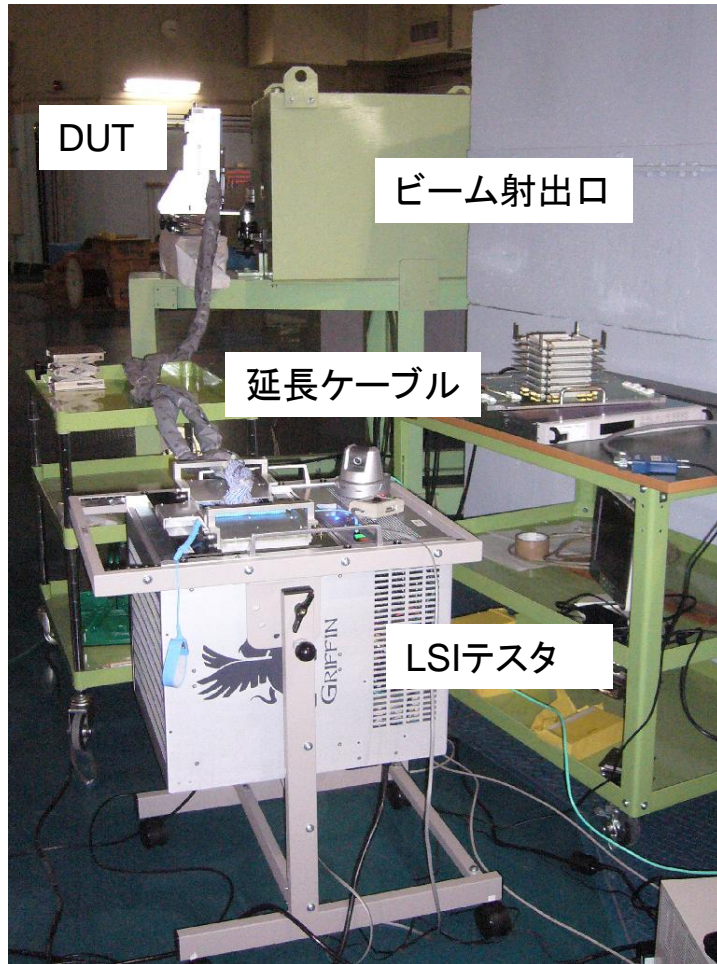
K=140 MeV  
 $\Delta E/E < 0.1\%$   
Since 1973

核化学実験  
Kコース

# RCNPを利用している企業

- 自動車用半導体
- スパコン向け半導体
- DRAM, フラッシュメモリ製造
- インフラ系
- 耐放射線LSI専業
- 興味を持っている企業
  - 日本電器大手
  - 韓国電子大手 (2017年2月実施予定)
  - 米国ネットワークスイッチ製造 (2017年2月実施予定)
  - ロシア宇宙研

# 中性子実験セットアップ



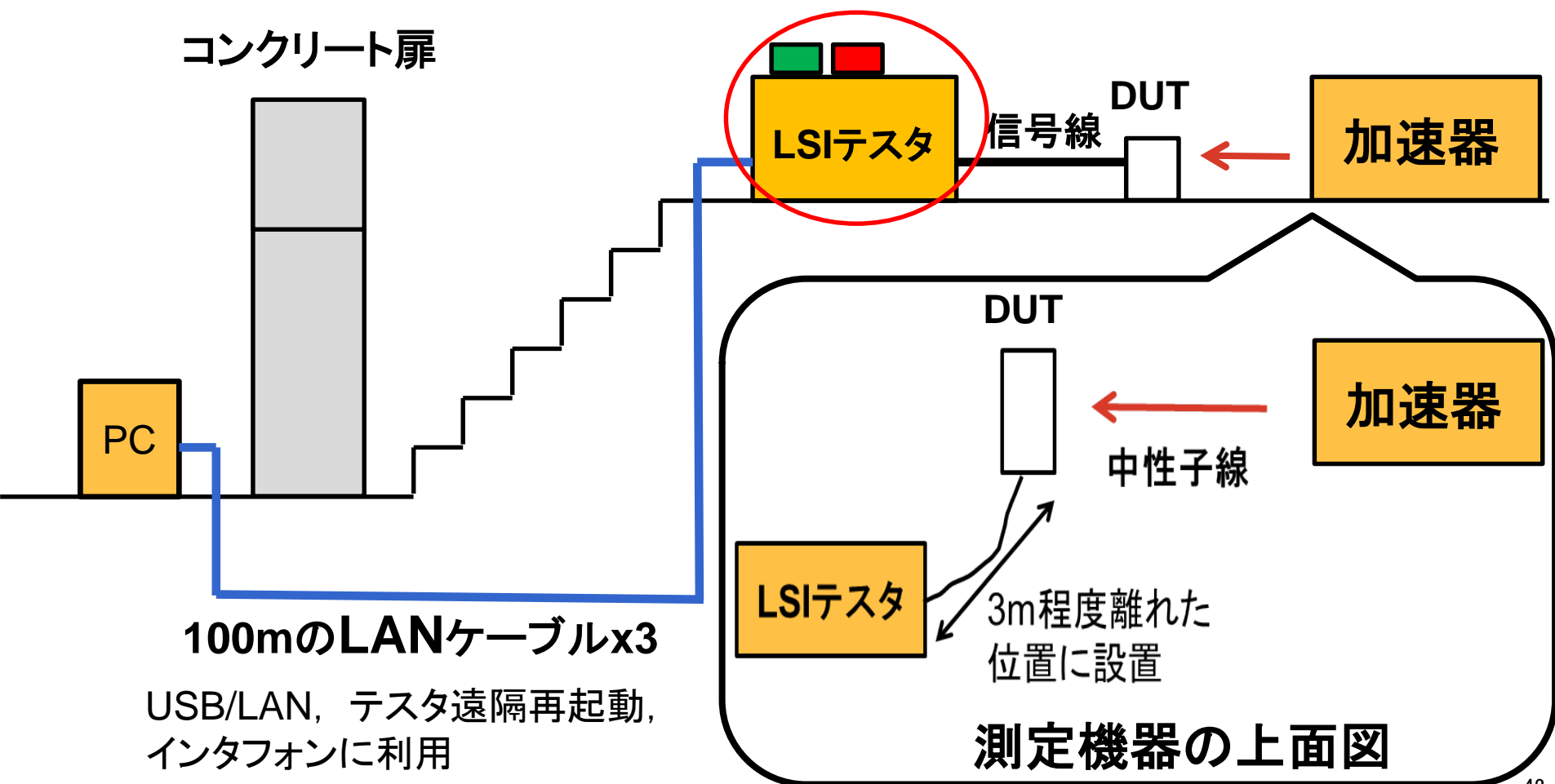
- 可搬型LSIテスタにより実施
- ビーム射出口直後に測定器はおけない
  - ソフトエラーで誤動作
  - 4m離す治具を作成
  - 要暫時再起動→リモート電源遮断装置
- PCは実験室外
  - USBをLANに変換

# 中性子実験セットアップ

Kobayashi Lab.

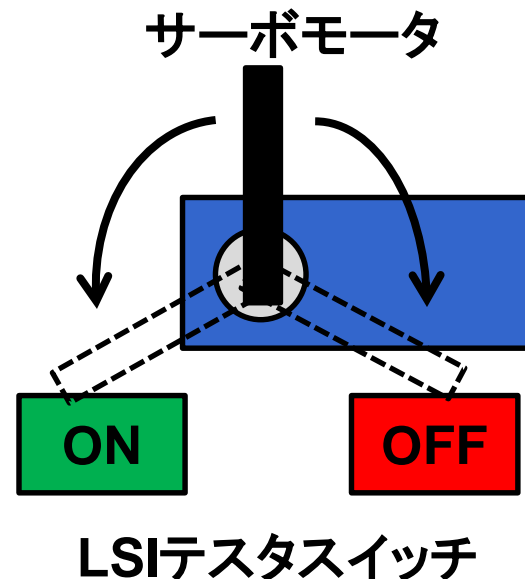
## 観測室

## 実験室



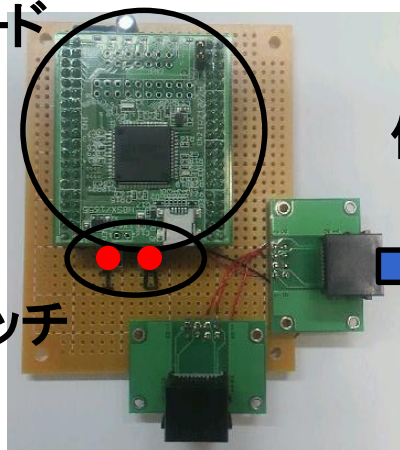
# テスト遠隔再起動装置

- 物理的にスイッチをオン・オフしないと再起動しない
- スイッチ切り替えモジュール
  - サーボモータ
- サーボモータの制御モジュール
  - マイコン制御によるデジタル回路



マイコンボード

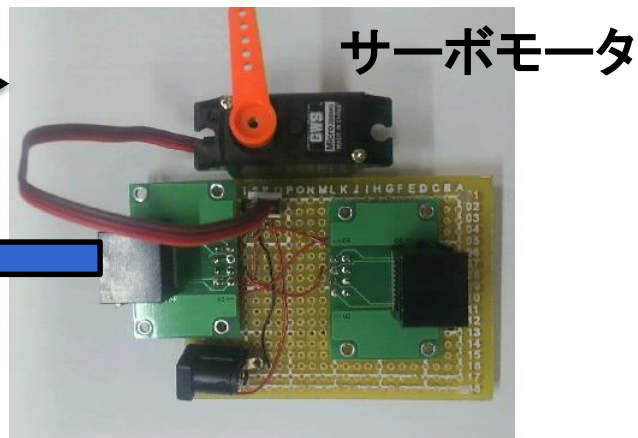
プッシュスイッチ



信号送信  
(50Hz)



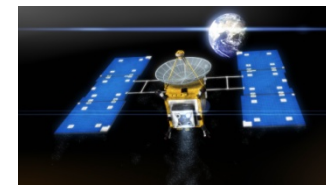
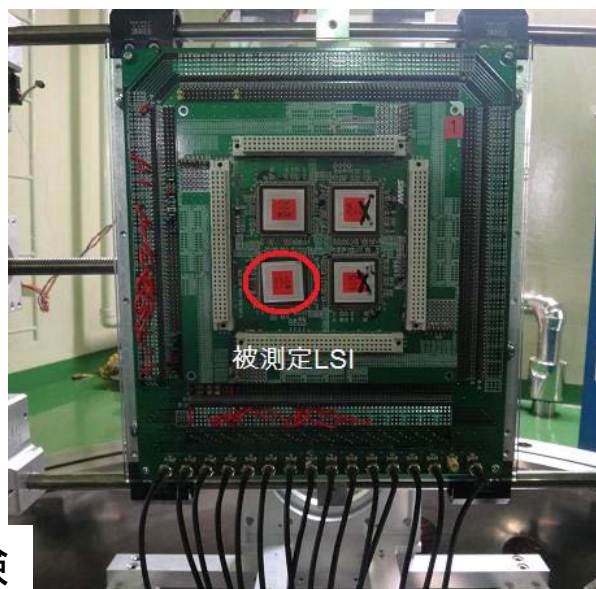
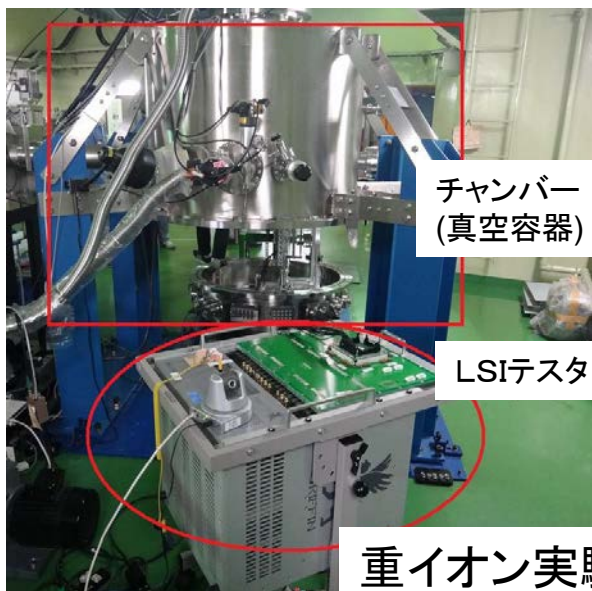
100mのLANケーブル





# 重イオン照射試験

- JAEA(現qst)高崎量子研究所(TIARA)にて実施
- JAXA所有の大型チャンバーを用いて測定
- 申請枠で安価に利用
  - 1.5万円/h (別途操作補助費用必要)



# 高崎量子応用研究所

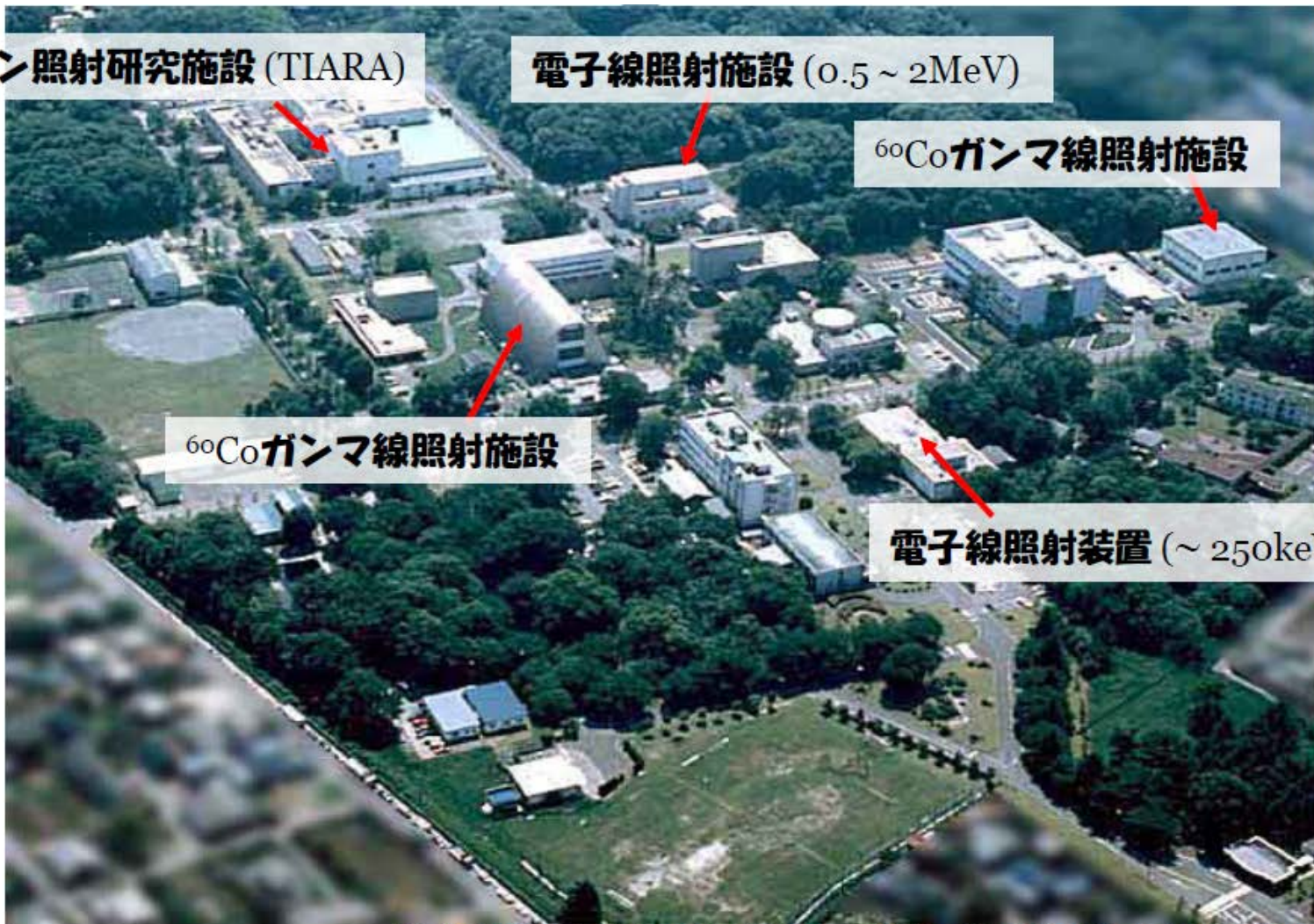
イオン照射研究施設 (TIARA)

電子線照射施設 (0.5 ~ 2MeV)

$^{60}\text{Co}$ ガンマ線照射施設

$^{60}\text{Co}$ ガンマ線照射施設

電子線照射装置 (~ 250keV)



高崎量子応用研究所 群馬県高崎市綿貫町1233

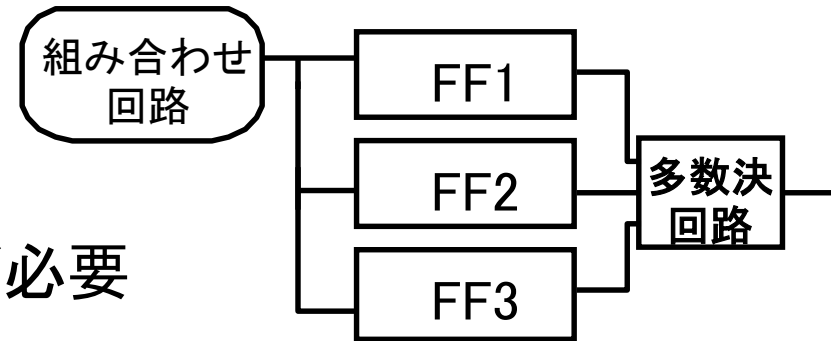
# 講演内容

- 信頼性一般
- 一時故障(ソフトエラー)とは？
- ソフトエラーの実例紹介
- スーパーコンピュータの信頼性
- ソフトエラーの実測方法
- **ソフトエラーに強靱な回路構造**
- 宇宙応用に向けて
- まとめ

# ソフトウェアエラー対策

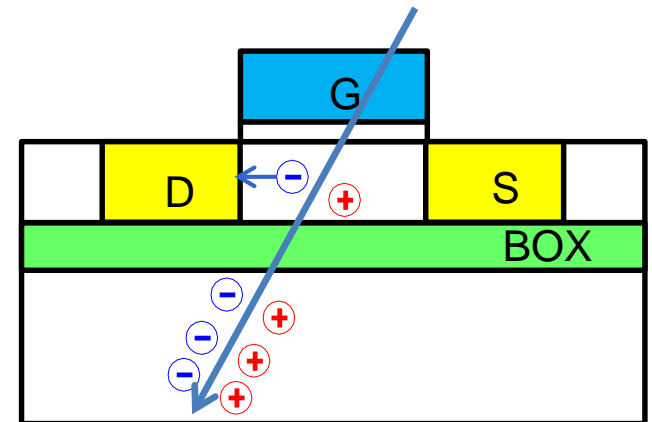
## ■ 多重化して結果を比較

- 面積、消費電力の増加大
- 複数ビット反転(MCU)の対策が必要



## ■ 電荷収集量を抑制

- トランジスタ直下に絶縁層を持つFD-SOI
- 製造コストが高い
- ソフトエラー耐性は10-100倍
- 面積、消費電力の増加なし

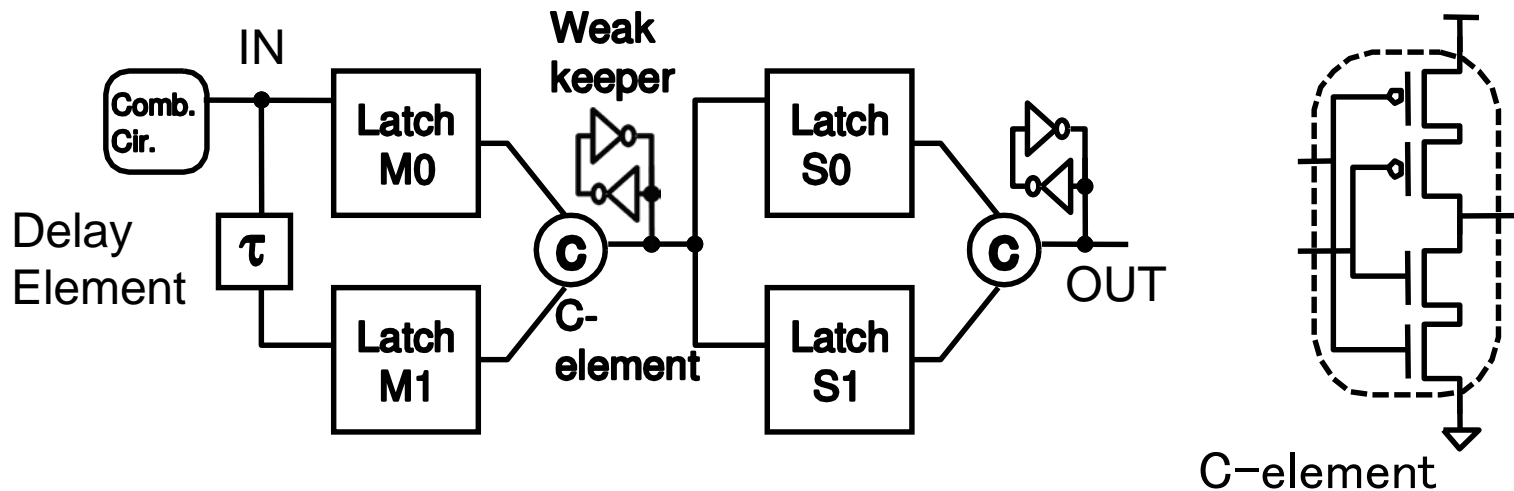


## ■ 再実行/同時実行

- 2回実行
- 実行時間/ハードウェアが倍

Fully-depleted  
Silicon on Insulator  
(FD-SOI)

# 省面積な耐ソフトウェアエラー回路

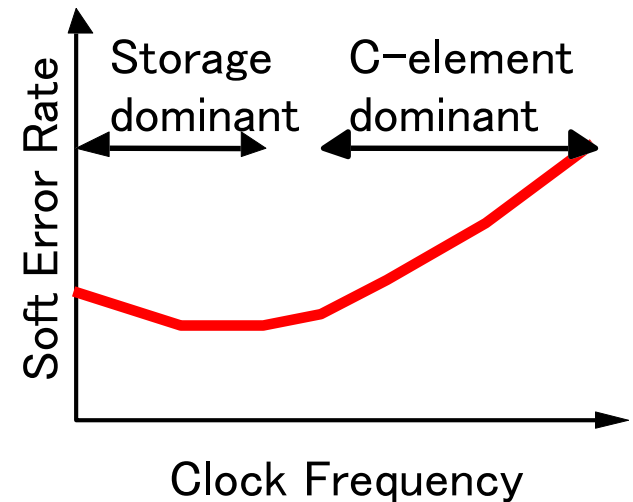
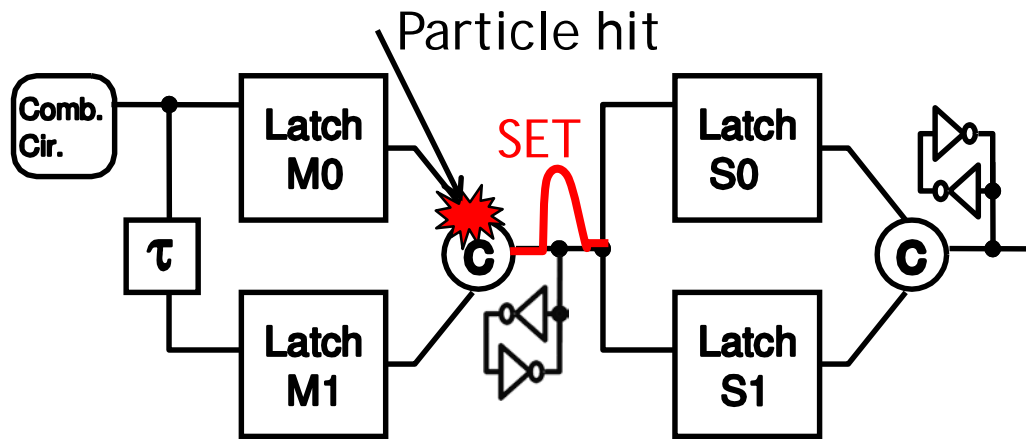


■ BISR by Intel, Stanford [S. Mitra et al. ITC2006]

## ■ BISR (Built-In Soft Error Resilience)

- ラッチの値が異なる場合、C-elementが高抵抗状態になり、weak keeperが値を保持
  - ラッチが反転してもエラーにならない = SEUに耐性
- 三重化回路よりも面積、消費電力が小さい

# BISERの問題点

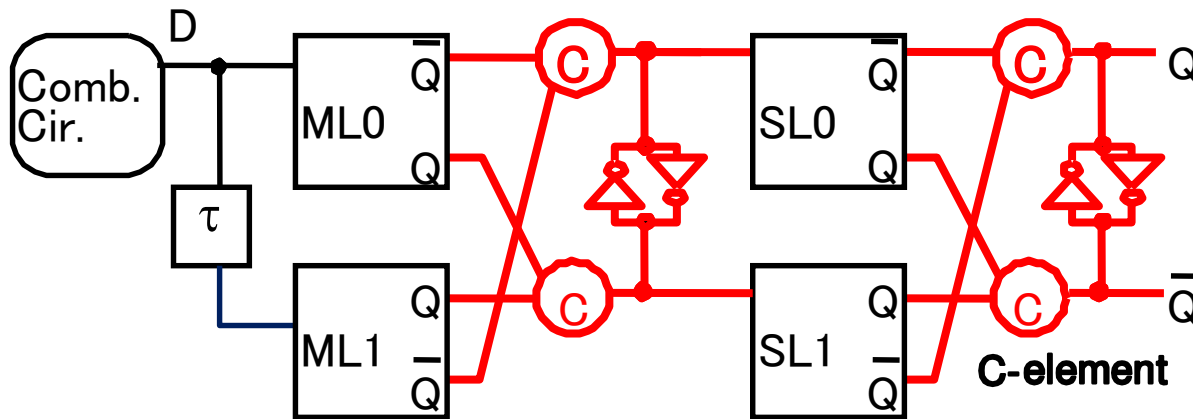


- C-elementでSETが生じるとエラーとなりやすい
  - 2つのスレイブラッチの入力に直接接続しているため
  - 動作周波数が高いとエラー率が上昇



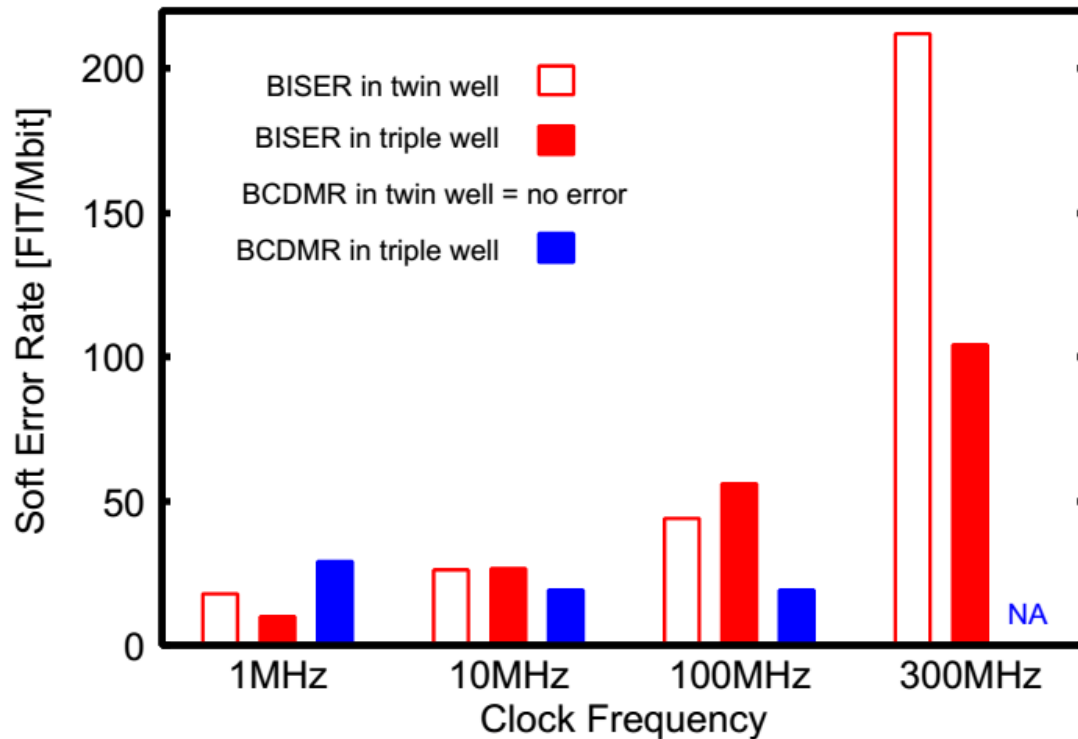
- BISER内部で生じるSETを除去する必要がある

# 改良型耐ソフトウェアFF



- BCDMR (Bi-stable Cross-coupled DMR) FF
  - C-elementも2重化して別々のラッチに接続
  - weak keeperはC-element間で共有
    - weak keeperを両側から書き換えるため、ばらつきにも強く動作速度も改善
- 日米で特許取得済

# ソフトウェアエラー耐性評価結果



通常FFのSER  
344 FIT/Mbit

- BISSERは300MHzで最もSERが高い
  - ソフトエラー耐性が通常FFの2倍程度に
- Twin well, triple wellは製造工程の差異
  - Twin wellは基板電位が安定でSERが低くなる

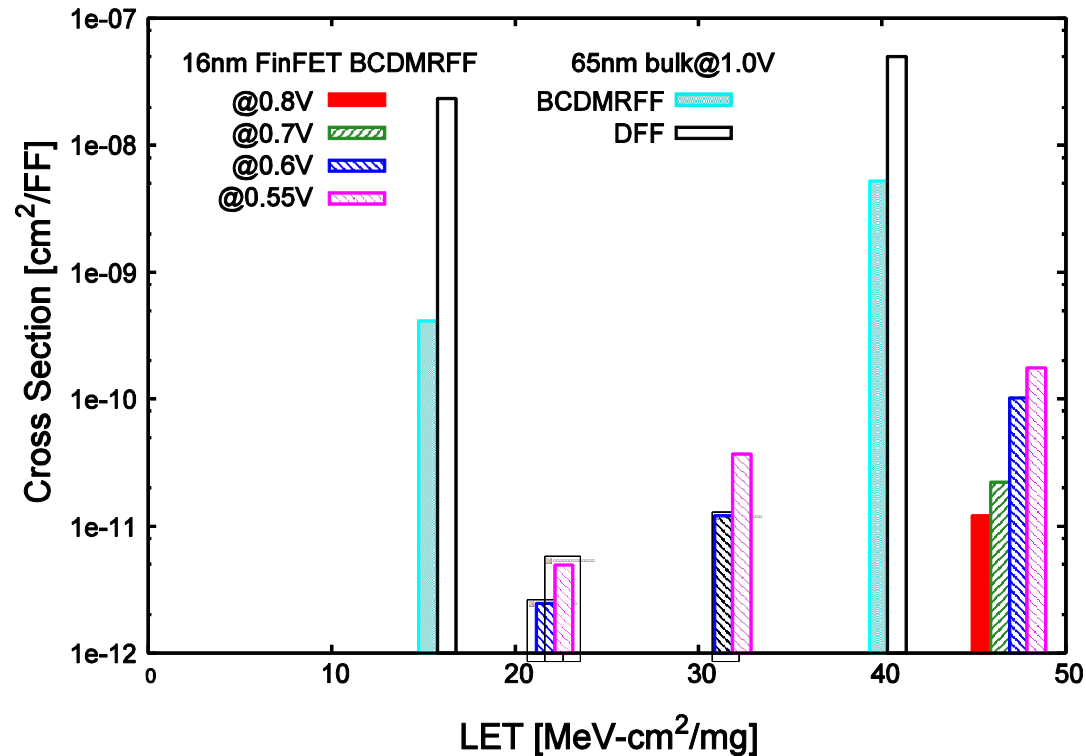


# 各種プロセスによる耐性比較

- 65, 28, 16 nmにて試作評価済

Process	65 nm bulk		16 nm FinFET		
	DFF	BCDMR	BCDMR		
CLK	0, 1 (average)		0	1	
Interleaved	-	No	Yes	No	
SER	554	50	9	13	6

中性子に対するエラー耐性比較



重イオンに対するエラー耐性比較

# 講演内容

- 信頼性一般
- 一時故障(ソフトエラー)とは？
- ソフトエラーの実例紹介
- スーパーコンピュータの信頼性
- ソフトエラーの実測方法
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- **宇宙応用に向けて**
- まとめ

# 宇宙ミッションの課題

- 失敗すると損害甚大(30億円)
- COTS(既製品)を使いたい
  - 入手の容易性と低コスト
  - スペースシャトルの退役は部品が入手できなくなったから
- 過酷な環境
  - 電力, 温度, 放射線
  - 低電力, 高耐環境, 高放射線耐性
- 微細化に伴うLSI試作の初期コスト増大
  - FPGAを使いたい, SRAMが放射線に脆弱
  - 放射線に強いワンタイムプログラムFPGAは高額
    - 開発時に高コスト →

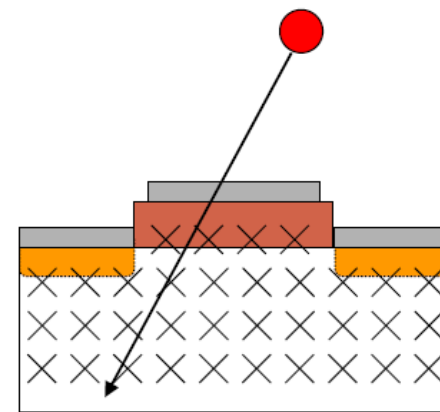
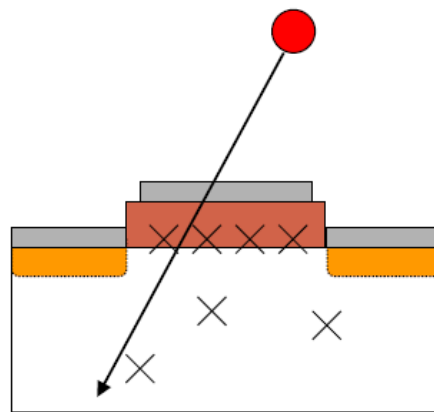
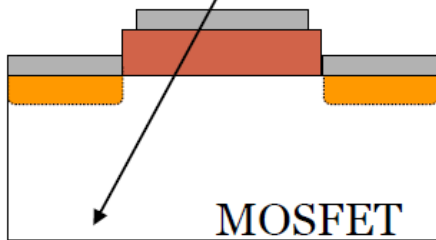


原子スイッチFPGA

# 宇宙環境での放射線の影響

- トータルドーズ効果 : 多量のガンマ線等 (酸化膜・電離)
- はじき出し損傷効果 : 多量の電子線等 (半導体結晶・はじき出し)
- シングルイベント効果 : 1個の重粒子 (半導体結晶・電離)

シングルイベント効果  
(確率的)  
誤動作・破壊



トータルドーズ効果  
(kGyオーダー)  
しきい値電圧のシフト・移動度低下・リーク電流増加

はじき出し損傷効果  
(MGyオーダー)

→ 運用期間  
(照射量)

SEE

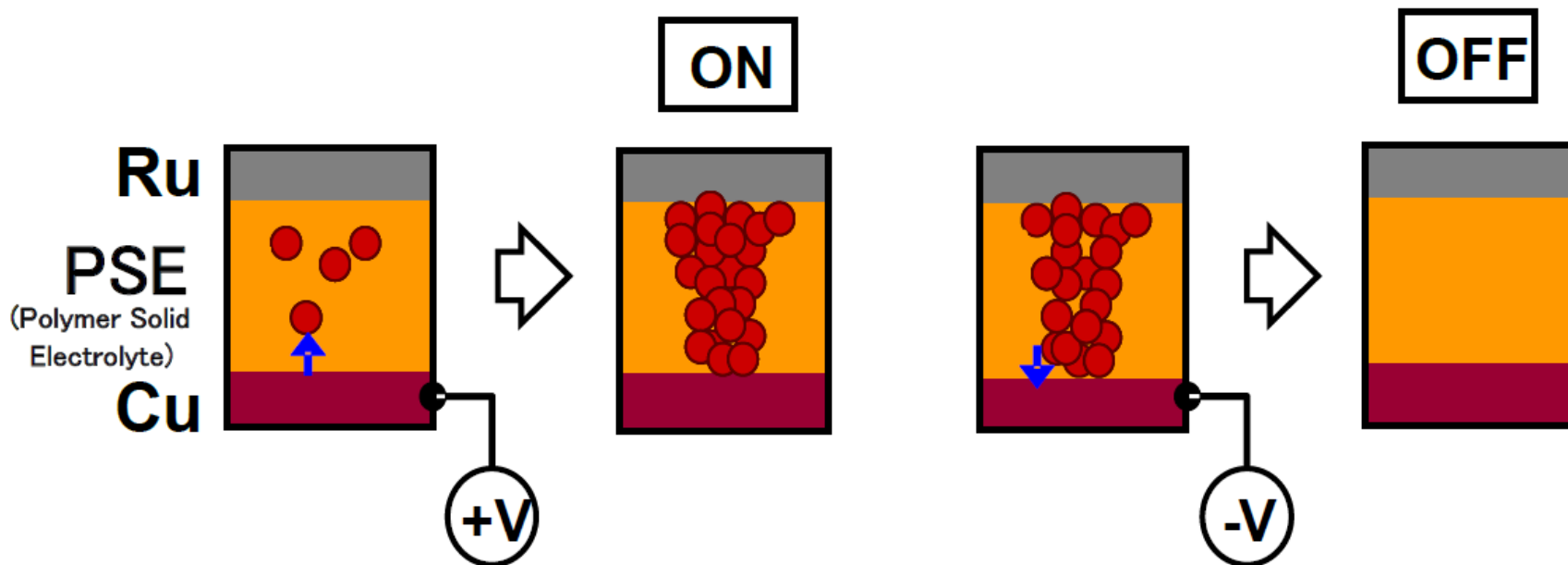
TID

DDD

# 原子移動型スイッチとは

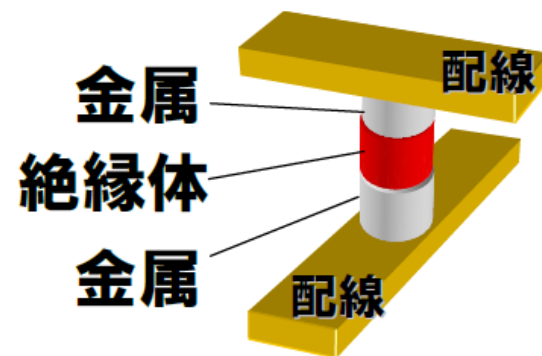
LEAPプロジェクト資料より

## ■ Cuイオンのイオン伝導・電気化学反応を利用した抵抗変化スイッチ



## ■ 特徴

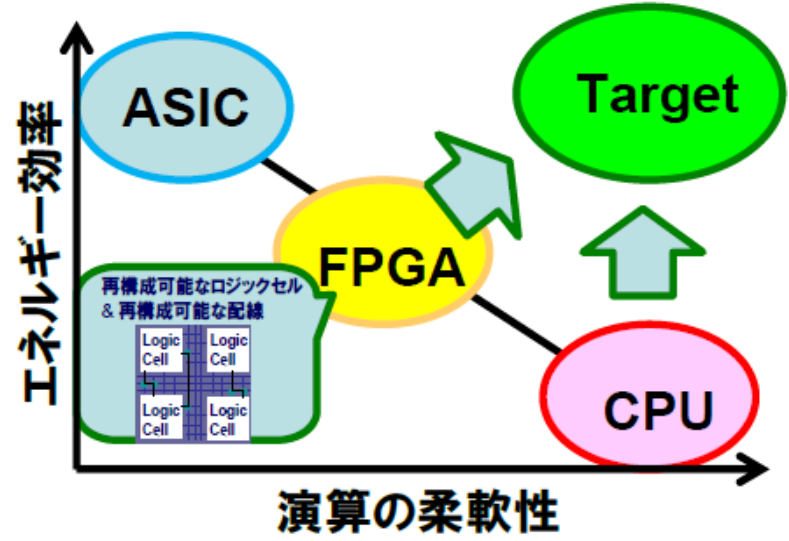
- 高On/Off抵抗比 ( $> 10^6$ )
- 不揮発性
- 書換可能 ( $> 10^3$ )
- 小面積



# 回路再構成機能によるシステムの省電力実現

LEAPプロジェクト資料より

- 省電力CPU  
+ アクセラレータ(ハードウェア構成)  
により低消費電力・高フレキシビリティ化が可能
- ハードウェア構成によりシステムの  
大幅な電力低減を目指す

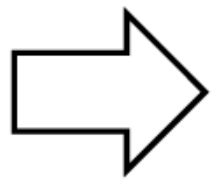


**高性能CPU**  
高性能プロセッサ > 100W

+

**OS、ソフトウェア**  
ミドルウェア

従来構成



省電力CPU

アクセラレータ  
回路再構成

省電力構成

一般的な処理  
(様々な処理)

用途に特化した  
ハードウェア構成  
(高処理能力)  
フレキシブルに変更

# 原子スイッチFPGAの宇宙応用

## ■ 動機

- 国産・対外輸出可能・安価・書き換え可能なFPGA
- SRAM型FPGAは米国の2社独占

## ■ 開発時には書き換えるが実装時には固定

- 開発コストと部品点数低減

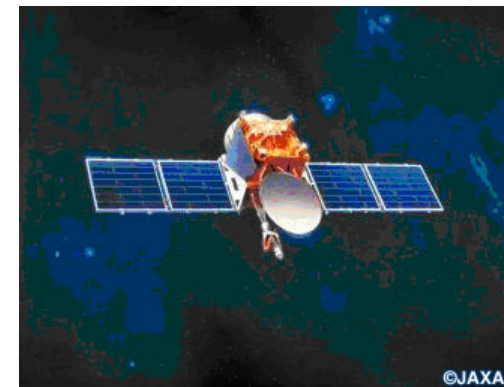
## ■ 原子スイッチは放射線に強い

- 高い電圧を長時間かけない限り変化しない

## ■ 下地の回路も放射線耐性が必須

- BCDMR FFを用いて耐放射線化

## ■ 人工衛星に搭載予定



# 講演内容

- 信頼性一般
- 一時故障(ソフトエラー)とは？
- ソフトエラーの実例紹介
- スーパーコンピュータの信頼性
- ソフトエラーの実測方法
- ソフトエラーに強靱な回路構造
- 宇宙応用に向けて
- **まとめ**





# まとめ

- ソフトエラーは身近な問題
- HPCではソフトエラー対策なしには動かない
  - ミッションクリティカルな分野ではソフトエラー対策必須
- 中性子・重イオン実験には加速器が必須
  - 重イオンは真空チャンバー内
- 低電力・低遅延・高耐性の回路が必須
  - BCDMR FFにより実現
  - 65nm, 28nm, 16nmで実証済
- 共同研究
  - 地上用: 半導体関連会社2社
  - 宇宙応用: JAXA関連2社(1社は交渉中)