



半導体におけるソフトエラーの 発生原理とその評価方法

第1回A-FNS研究会

2021/02/19

京都工芸繊維大学

電気電子工学系 教授

小林和淑

kazutoshi.kobayashi@kit.ac.jp

講演内容

- ソフトエラーと集積回路 (LSI)
- ソフトエラーの実例紹介
- ソフトエラーの実測方法
- 電子機器のソフトエラー実測結果
- まとめ

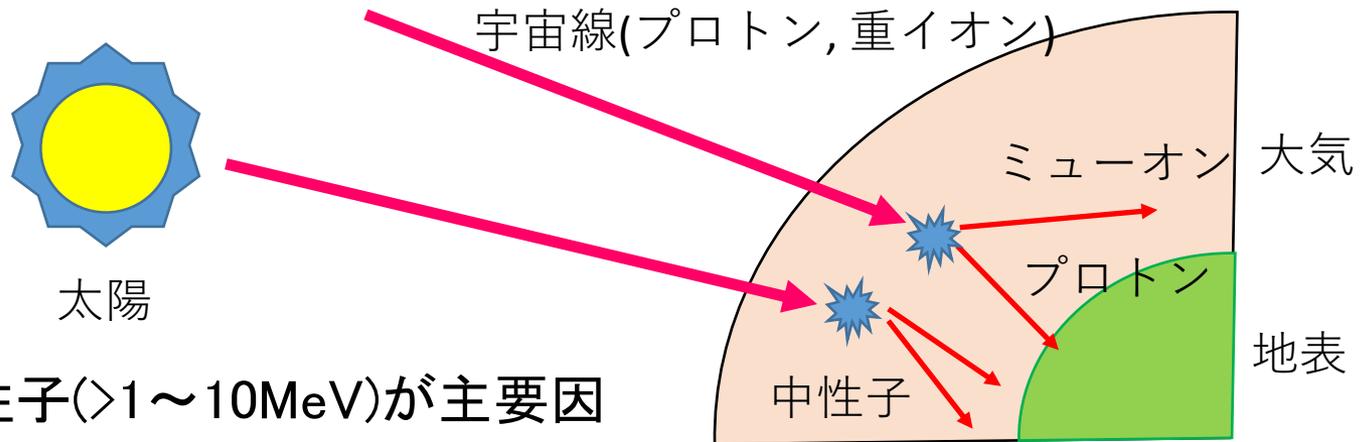


ソフトウェアとは

- ハードエラー(永久故障)との対比で, 電子回路の「一時故障」
 - ソフトウェアのエラー(バグ)ではない
- JEDEC JESD89A (国際規格)でのSoft Errorの定義
 - An erroneous output signal from a circuit that can be corrected by performing one or more normal functions of the (e.g. retrying operation, rewriting data, power cycling, etc.) Synonymous with SEU.
 - 再実行, 再書き込み, 電源の再投入等で訂正できる回路からのエラー出力. SEUと同義
- SEU: Single Event Upset
 - An error in a circuit that is not permanent (i.e. not a hard error) caused by the change in state of a latch, flop, memory cell from a single energetic particle strike.
 - 1度の粒子線衝突(シングルイベント)により回路中のラッチ, フリップフロップ, メモリセルの状態が一時的に変化するエラー

集積回路(LSI)中の記憶素子 (後述)

地上でのソフトウェア



- 高エネルギー中性子(>1~10MeV)が主要因
 - 宇宙線が大気と核反応して発生(10数個/cm²/h)
 - 高度10km(飛行高度)では地表の100倍に相当
- 熱中性子(<0.025MeV), パッケージ(LSIの入れ物)中の放射性不純物からの α 線も一因



- SRAM(メモリ) 1Mbitで約200年に1回エラーが発生
 - Intel core i7-6920HQ (SRAM 8MB) なら4年に1回
 - クラウドサーバ, スパコンでは大問題

ソフトウェア発生要因

宇宙

- 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
 - ロケット, 人工衛星 数台/年, **30億円/台**
- 少量の耐性を強靱に

プラズマ圏

地上

- α 線, 中性子により発生
 - α 線はLSI周辺(パッケージ)から発生. 低 α 材料で低減可
 - 中性子は**遮蔽困難**
- 数が多い
 - スマホ 1億台/年
 - 自動車 100万台/年
 - 問題を起こすと大変. エアバッグは**3000億円**
- 大量の耐性を強靱に

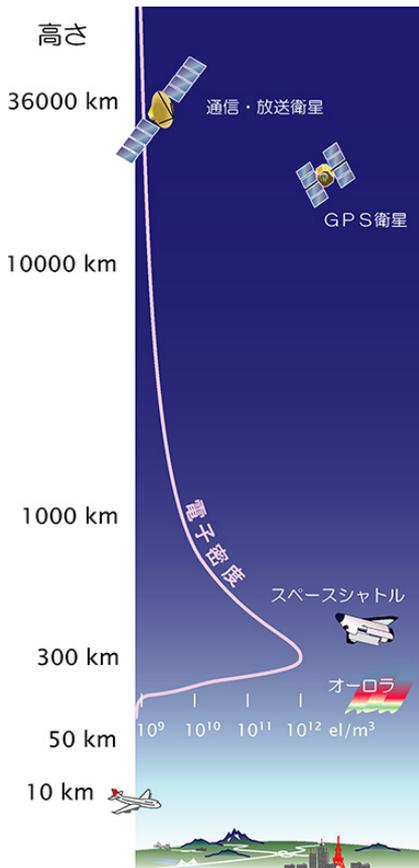
(熱圏)

電離圏

(中間圏)

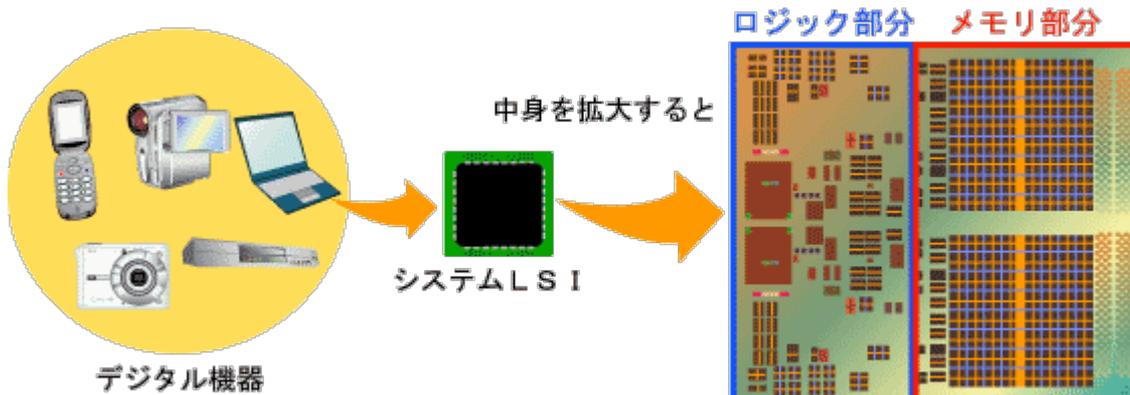
(成層圏)

(対流圏)



http://aer.nict.go.jp/people/spe_yokoyama.html

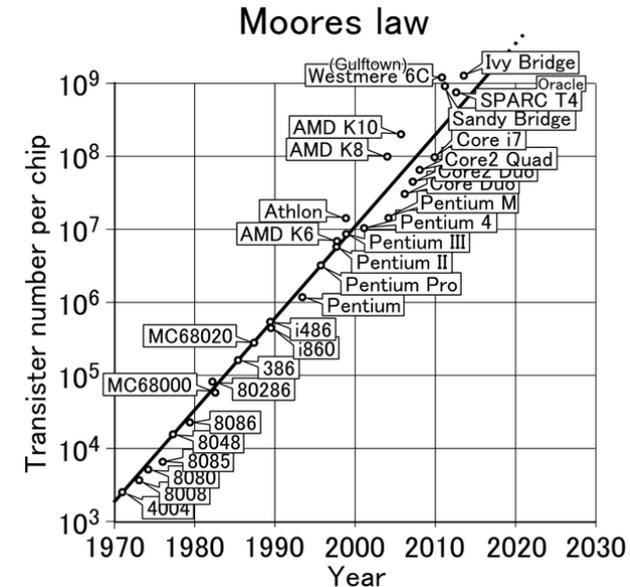
LSIってなんだろう？



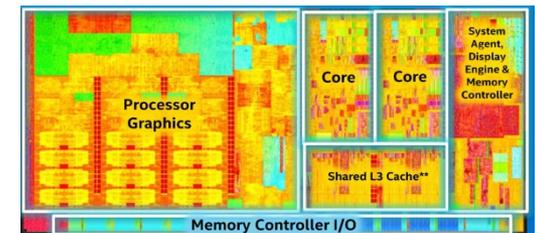
- Large Scale Integrated circuit (大規模集積回路) の略
- 半導体(主にSi)を材料として, 多数のスイッチ(トランジスタ)を集積
- ムーアの法則によりべき乗オーダーでトランジスタ数が増大
- Apple iPhone11用A13 Bionicは, 7nmプロセス(製造技術)で, 85億個のトランジスタを集積
 - 2020年9月に5nmプロセスのA14搭載のiPadが発表. トランジスタは118億個!

富士通HPより

<https://www.fujitsu.com/jp/group/labs/resources/tech/techguide/list/cmos/p02.html>



<https://betanews.com/2013/10/15/breaking-moores-law/>

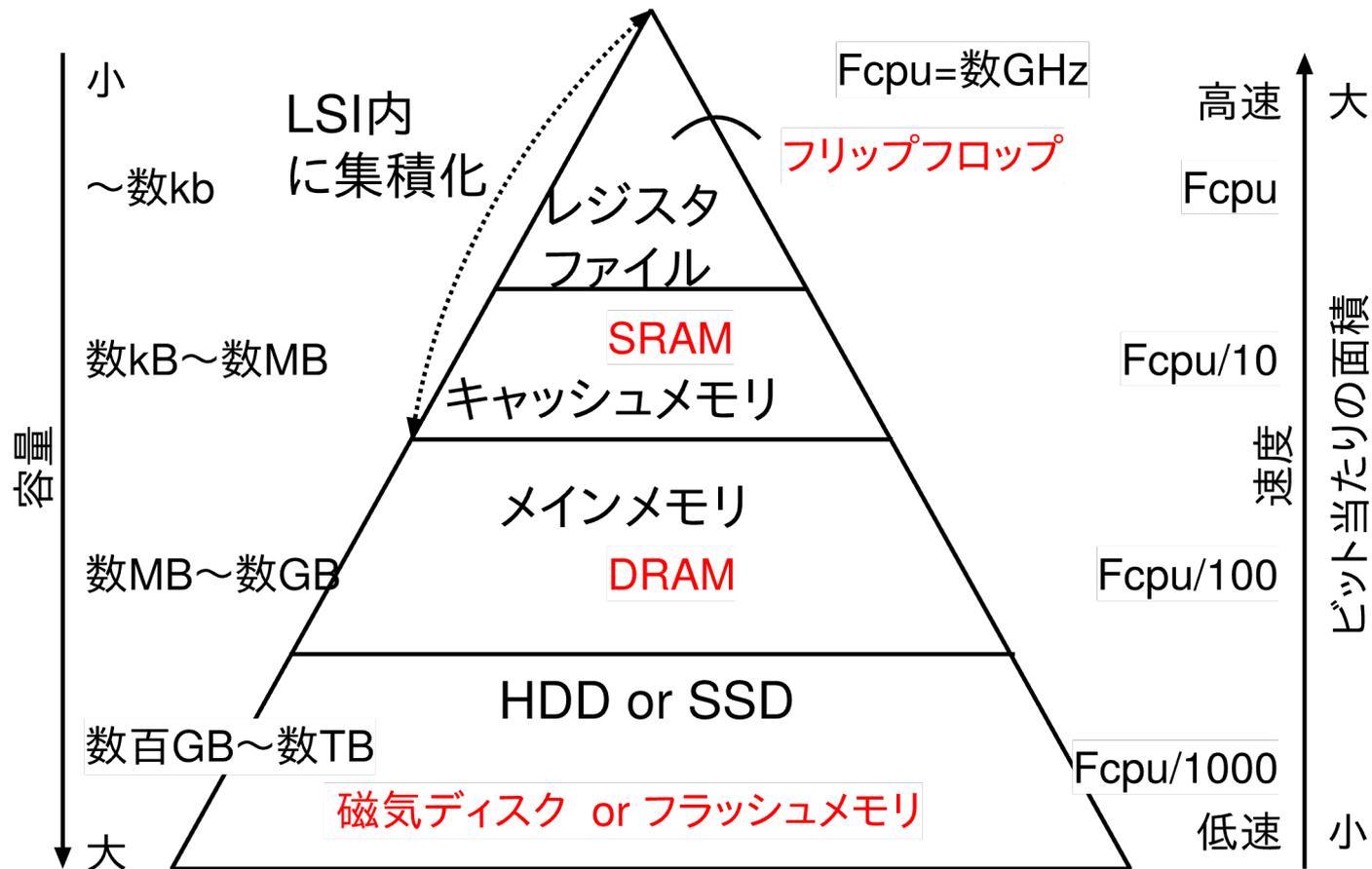


13億個(82mm²)@2014
Core M

14nmルール⁶

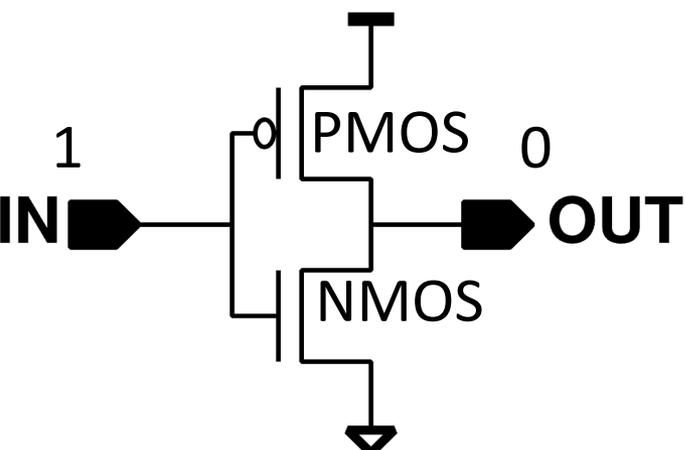
電子回路中の記憶素子

- 記憶素子の記憶値が反転するとソフトウェア
– フリップフロップとSRAMがソフトウェアを起こす。



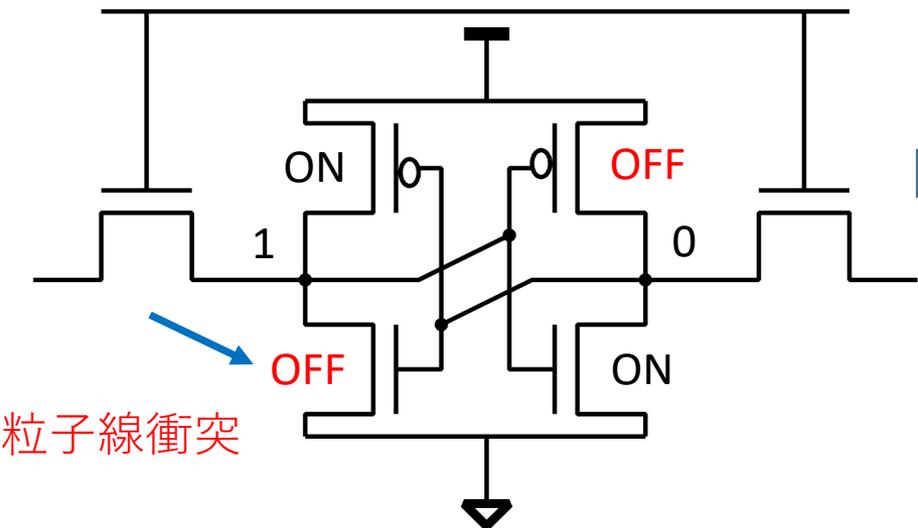
コンピュータの記憶階層

CMOS論理ゲートとSRAMのソフトウェア



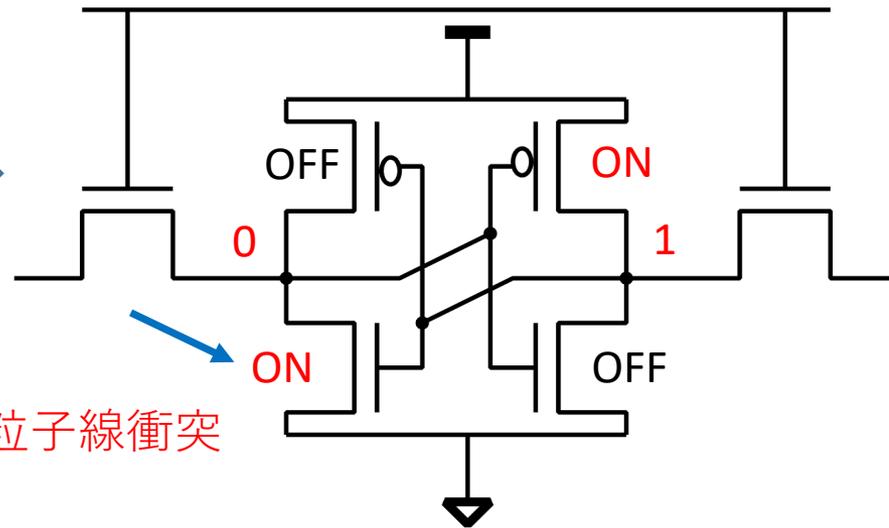
CMOSインバータ(NOTゲート)

- N型MOSTランジスタとP型MOSTランジスタを対にして作るCMOS論理ゲート
 - NMOS: 入力1でON
 - PMOS 入力0でON
 - NとPが相補的に働くのでComplementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)と呼ぶ. **非動作時電力ほぼ0**
 - バイポーラトランジスタ: CMOS普及前の技術. 高電力
- LSI中にはCMOS構造の論理ゲートが多数敷き詰められている



粒子線衝突

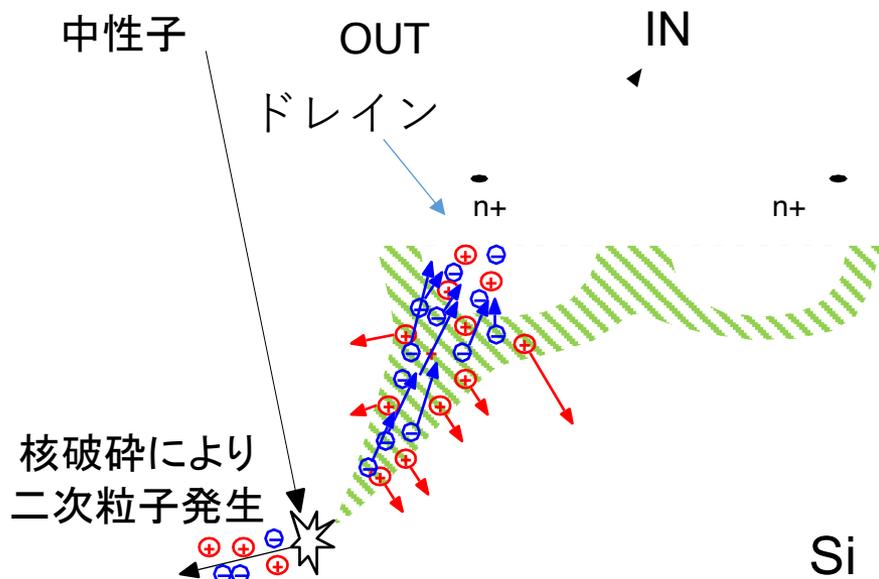
SRAM (Static Random Access Memory)



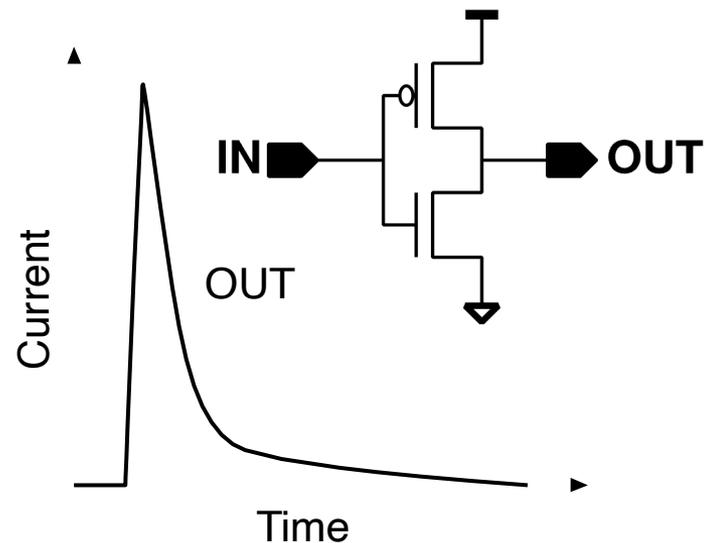
粒子線衝突

粒子線衝突でOFF状態のトランジスタがONになって記憶値が反転

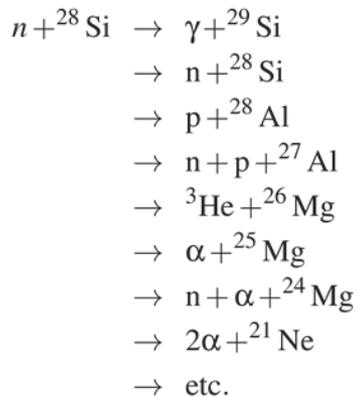
シングルイベントによる物理現象



MOSトランジスタ断面図



放射線による励起電流



- 放射線の電離効果により電子正孔対が発生
 - 中子はSiとの衝突による核破碎による2次粒子により
- 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
- トランジスタが一時的に導通
 - LSIの誤動作(ソフトエラー)の原因に

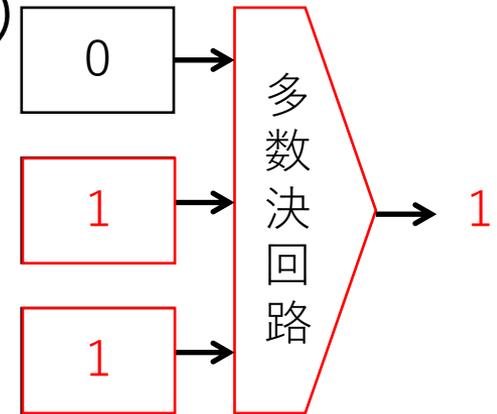
記憶素子(メモリ)のソフトウェアエラー対策

- フリップフロップ(LSI内の高速な記憶素子)

- 多重化(三重化)

- 記憶素子を多重化して**多数決**

- 1ビット反転(**SEU**)には強い. 2ビット反転(**MCU**)すると✖



- DRAM/SRAM: メイン/キャッシュメモリ

- Error Check Code (ECC)

- ワード毎に検査ビットを付加し**SEU**を訂正

- **MBU**(同一ワードの複数ビット反転)は検出のみ



講演内容

- ソフトエラーと集積回路 (LSI)
- **ソフトエラーの実例紹介**
- ソフトエラーの実測方法
- 電子機器のソフトエラー実測結果
- まとめ



ソフトウェア？実体験

- ハワイ行きの飛行機

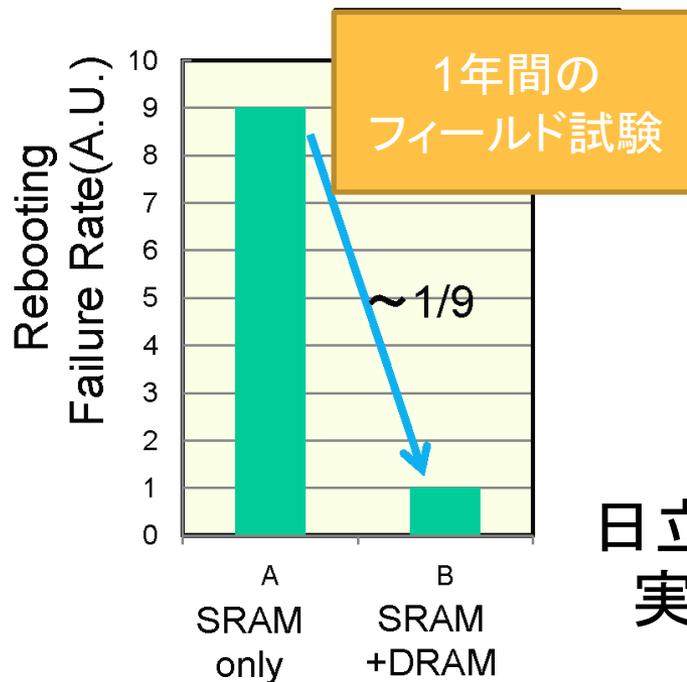
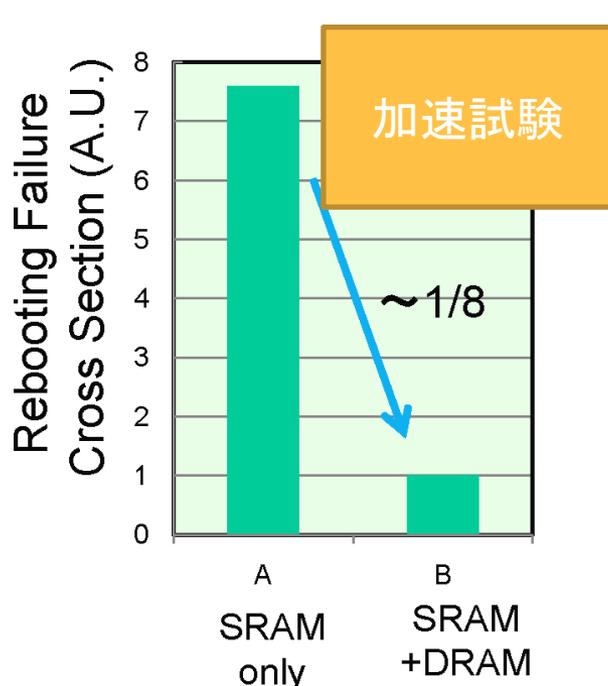
- iPod touch (初代)の、ボリュームが誤動作
- 再起動で復活

- 量子機構(QST)の加速器見学時

- 加速器停止時に見学
- 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
 - 電源OFFもソフトスイッチ(正常動作してないと効かない)
- バッテリーを抜いて対処



実動機器における一例



日立製作所の
実験データ

- 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

ソフトウェア問題：実害



The screenshot shows the EE Times website interface. At the top left is the EE Times logo with the tagline 'United Business Media'. To the right is a banner for 'ESD: Learn today. Design tomorrow.' with the date 'Farnborough • October 6 - 8, 2009'. Below the banner is a search bar and a 'Go' button. A navigation menu includes 'Home', 'Research', 'Forums', 'Design', 'New Products', 'Careers', and 'Blogs'. The main article title is 'SRAM soft errors cause hard network problems' by Anthony Cataldo, dated 08/17/2001. The article text begins: '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'. To the right of the article is a sidebar with options: Print, Email, Reprints, RSS, Digital, and a SHARE button.



Sun CEO
Scott McNealy
[Forbes 2000]

金輪際IBM社の
SRAMは購入し
ない!!!



[EETimes 2001]

- サーバ用メモリで生じたソフトウェアによってSun Microsystems社のワークステーションがクラッシュ
- たまたまソフトウェアに脆弱だったIBM社のSRAMを使用
- **ソフトウェアは製品の信頼性を低下**

スーパーコンピュータとソフトウェア



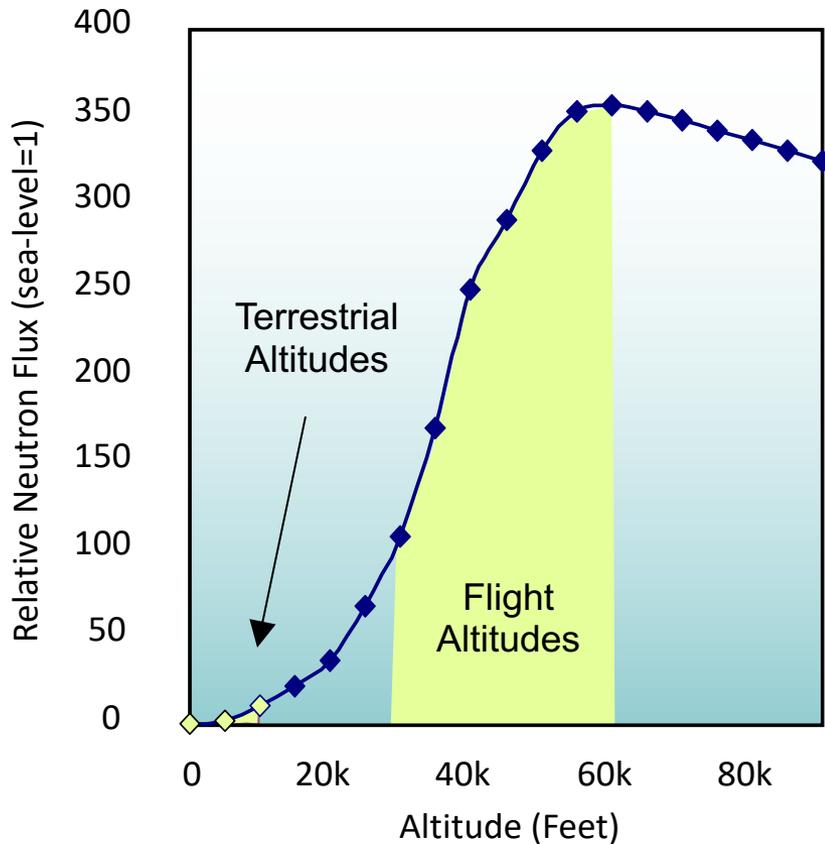
「88,128個のCPUなどから構成されるシステム全体が29時間28分にわたって無故障で動作したことは、世界最大級の超大規模システムの安定性を実証することになりました。」

(理化学研究所:広報活動 2011/11/2)

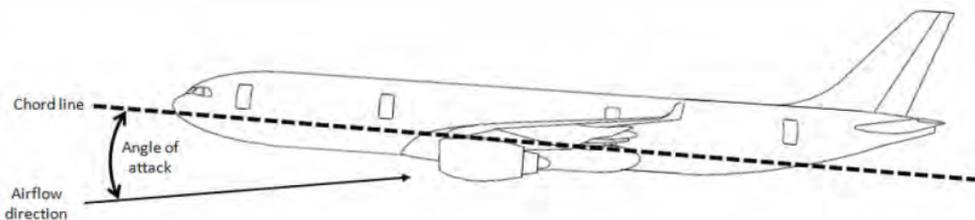
- 京コンピュータではシングルイベントが**数十分に1回**発生
 - 京コンピュータ全体でSRAM 4.4Tbit SRAM
 - 100倍の耐性または99%のエラー検出でようやく1日稼働
 - ハード・システム・OS全てでソフトウェア対策



航空機への放射線の影響



- 航空高度は大気が薄く、中性子量が多い
 - 約100倍@10,000m (30,000 feet)
- 2008年10月 Airbus A330の事故
 - フライバイワイヤの制御システム故障により急降下
 - 1/3の乗客と3/4の乗員が怪我



ソフトウェアで特損計上

宇宙線の影響で30億円の特損計上、横河電の4～6月期

2019/8/6 20:30

 保存  共有  印刷     その他 ▾

降り注ぐ宇宙線が業績にも影響——。横河電機は6日発表した2019年4～6月期の連結決算で、宇宙線中性子が原因とみられる半導体部品の不具合に関する対策強化費用として30億円を特別損失に計上した。同社が顧客企業に販売するシステム制御機器に組み込む半導体部品が微細になったことで、宇宙線中性子の影響による不具合が生じるケースがあるという。

不具合は「ソフトウェア」と呼ばれる一過性の異常で、半導体に記憶されたデータが乱れて誤作動を起こすことがある。データを書き換えると正常な動作に戻る。横河電は顧客企業のソフトウェア対策などに関する費用を4～6月期に引き当て、純利益は前年同期比38%減の21億円となった。

売上高は1%増の902億円、営業利益は37%増の65億円だった。中東などの顧客企業の設備投資が旺盛で、主力のプラント関連の制御機器が好調だった。

20年3月期通期の業績見通しは据え置いた。売上高は前期比4%増の4200億円、純利益は2%増の290億円を見込む。米中貿易摩擦については「現時点で受注に影響は出ていない」（同社）としている。

- 日経新聞電子版記事より

自動車安全規格



- 自動運転の普及に伴い、自動車向けの安全規格(ISO26262)が制定
 - FIT(10⁹時間あたりの故障数)
 - 1000FIT: 10⁶時間(114年)で1回故障. **100万(10⁶)台の車: 1時間に1回故障**

Level	FIT rate	Objective
ASIL-A	< 1000	リアカメラ等の安全性に関わらない機器
ASIL-B, C	<100	ブレーキアシストやダッシュボードディスプレイなどの安全機器
ASIL-D	<10	自動運転向け

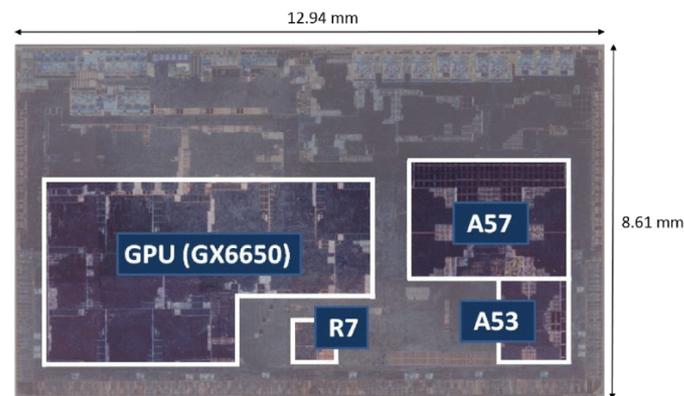
- 無対策では、集積回路ひとつあたり、10万FIT=1年に1回故障

ルネサスの自動運転システム向けSoC、ISO26262のASIL Bに対応する機能を実装 (1/2)

© 2016年02月03日 06時00分 公開

[斎藤由希, MONOist]

ルネサス エレクトロニクスは2016年2月2日、車載情報機器用SoC (System on Chip) を自動車向け機能安全規格ISO 26262に対応させるため、ハードウェアの故障を検出/防止する技術を開発したと発表した。SoCがプログラム実行を中断せずに自己テストを行えるようにし、ISO 26262の安全要求レベル全4段階のうち2段階目に当たるASIL Bで求められる診断カバレッジの達成を可能にした。また、ハードウェアの故障の原因の一つである瞬間的な電圧の降下を予測して抑止する機構も開発。これらの技術は、自動運転システムにも利用可能な同社の車載情報機器用SoCの第3世代品「R-Car H3」に搭載する。



Process	TSMC 16nm FinFET	CPU	Quad Cortex-A57 2.0GHz
Size	12.94 mm x 8.61mm, 111.36mm ²		Quad Cortex-A53 1.2GHz
Memory	LPDDR4-3200		Dual-core Lock-step Cortex-R7 800MHz
		GPU	PowerVR GX6650

[ISSCC2016]

講演内容

- ソフトエラーと集積回路 (LSI)
- ソフトエラーの実例紹介
- **ソフトエラーの実測方法**
- 電子機器のソフトエラー実測結果
- まとめ



ソフトウェアの実測方法

• フィールド試験

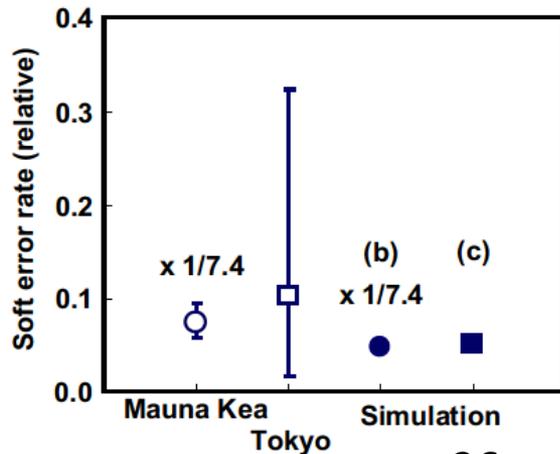
- 地上や高い山に多数のデバイスを並べてソフトウェアを実測
 - ハワイのマウナケア
- 実データが取れるが、時間と多数のデバイスが必要
 - 日立の例： 1年間

• 加速試験

- 単位時間あたりの粒子線数(フラックス)を加速
- α 線： ^{241}Am . 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. エラー多数観測可. 宇宙用LSIの評価可能

フィールド試験

- 多数のDUT(測定対象LSI)が必要
 - 100 errors/year at 1000 FIT/Mbit
- 高高度環境が利用される
 - 20x on 4000 m (13,000 feet)



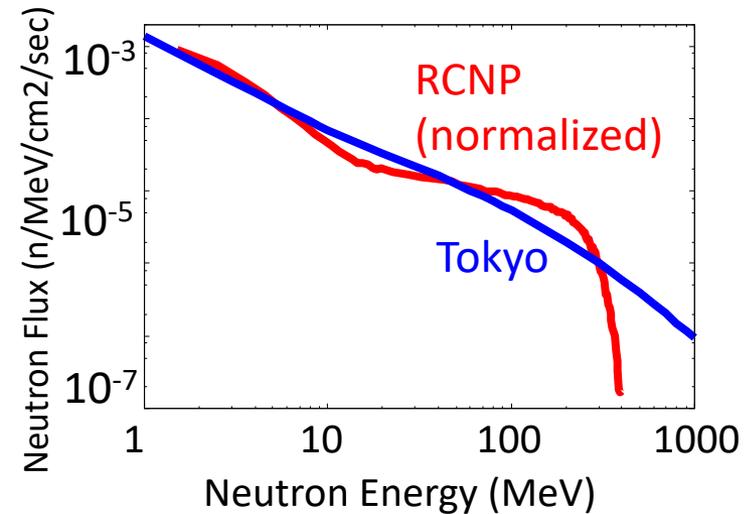
36 soft errors / 100 days

マウナケア山頂のすばる天文台でのフィールドテスト
[Tosaka et al., IRPS 2008]

- 中性子の影響を排除するために地下での実験も
 - 鉱山跡などを利用

中性子線による加速試験

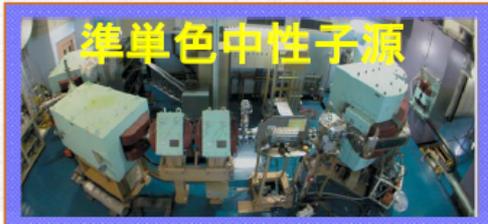
- 白色中性子を利用
 - 大阪大学RCNP(核物理研究センター)の加速器(日本唯一)
 - 2021年10月まで改装中で停止
 - 1時間で10万年分(約 10^8 に加速)
 - 改装後はビーム径3倍(30cm), 加速率も10倍に!
- “白色”=地上と同等のエネルギースペクトル
 - 特定のエネルギー付近にピークを持つ“準単色”ビームもあり(東北大CYRIC)
- 中性子は遮蔽困難(数mのコンクリート等)のため、測定に工夫必要



白色中性子源の中性子スペクトラム

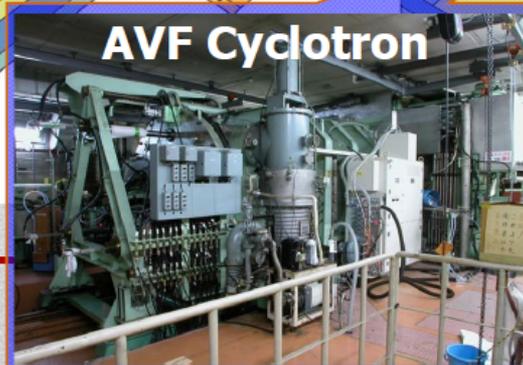
RCNPサイクロトロン施設

RCNP福田先生資料より



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

400MeVプロトンをW
ターゲットに当てて白
色中性子を生成

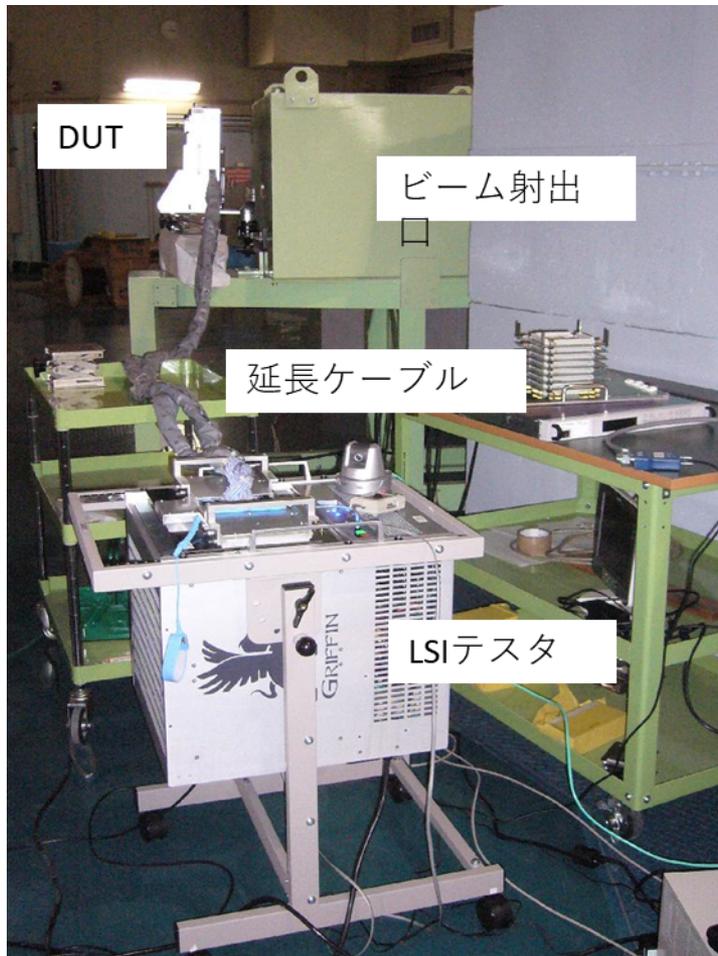


K=140 MeV
 $\Delta E/E < 0.1\%$
Since 1973

核化学実験
Kコース

現在リニューアル工事中。2021/10にアップグレードされ再オープン予定

中性子実験セットアップ

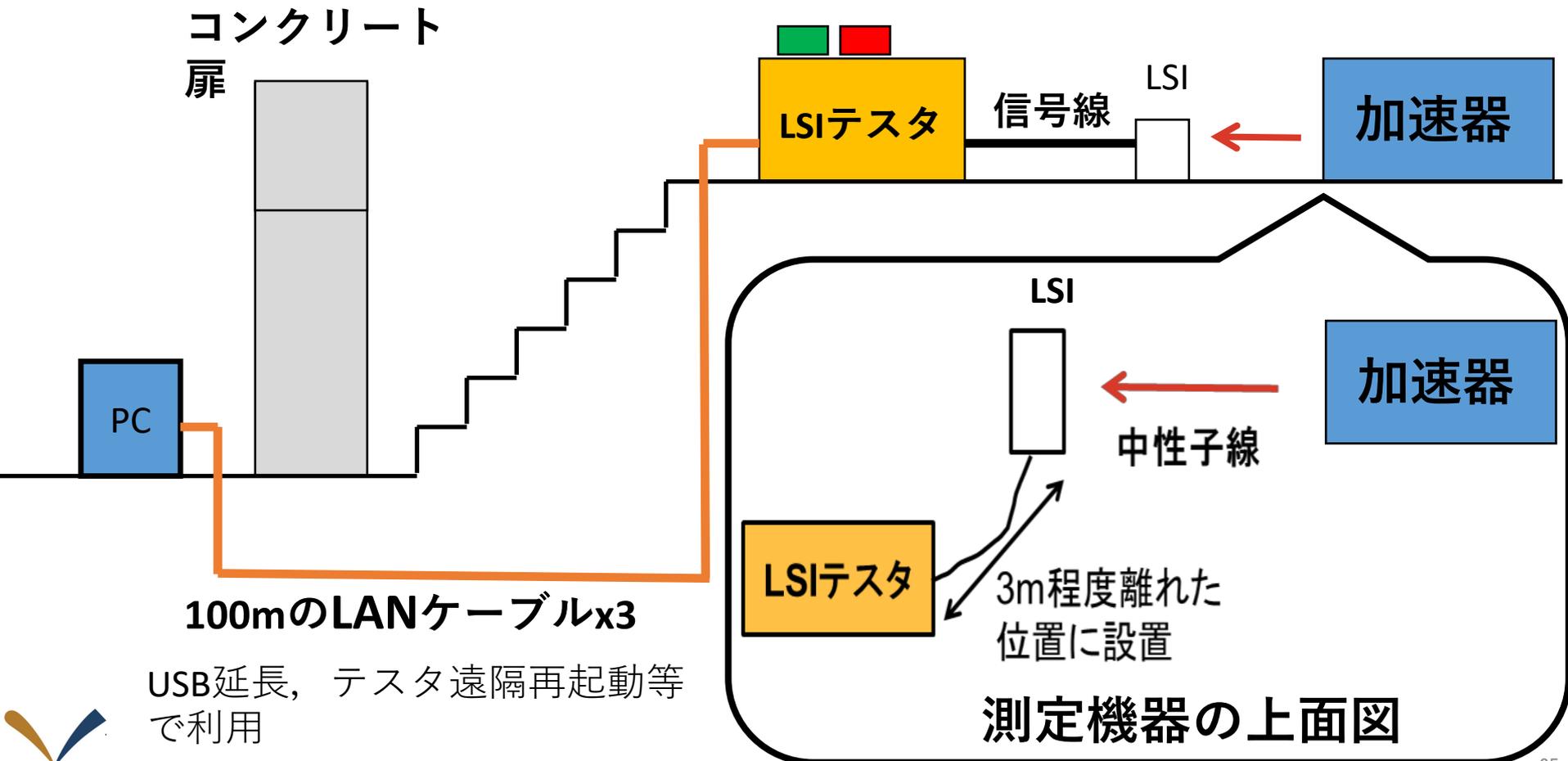


- 可搬型LSIテスタにより実施
 - LSIテスタ: LSIの動作試験を行う測定機器 (価格は一軒家程度)
- ビーム射出口直後に測定器はおけない
 - 測定器がソフトウェアで誤動作
 - 4m離す治具を作成
 - 要 暫時再起動 → リモート電源遮断装置
- PCは実験室外
 - 最先端LSI多数のため、すぐにおかしくなってしまう
 - USBをLANケーブルに変換
- 測定器の電源が中性子による焼損 (シングルイベントバーンアウト、SEB) を起こし壊れることもあり

中性子実験セットアップ

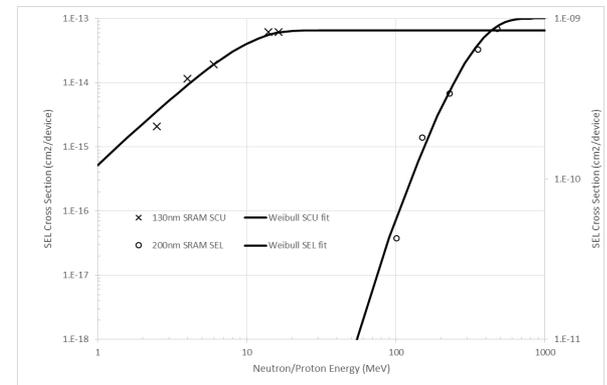
観測室

実験室

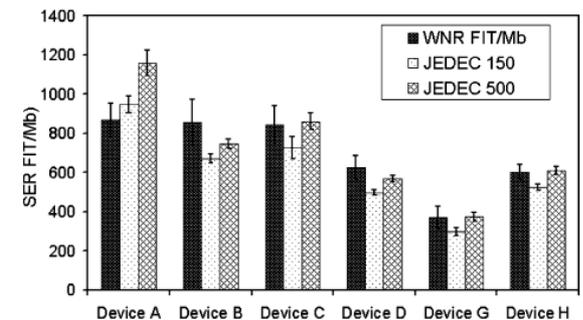


白色中性子以外の評価法

- 白色中性子ビームはエネルギーの合わせ込みが難しく、世界でも数カ所しか照射施設がない
 - RCNP in Japan, TRIUMF in Canada, LANSCE in US
 - RCNPは2019年4月より2021年10月まで改装中
- 準単色中性子で評価して合わせこむことも可能
 - 地上でのエラー率にするには14, 50, 100, 150 MeVでの評価結果よりワイブルフィッティング（白色より時間がかかる）JEDEC JESD89a（ソフトエラーの評価法の規格書）で定義済
 - 国内では、東北大CYRIC, QST TIARA. 阪大RCNPで準単色中性子実験が可能
- プロトンビームでの評価も可能
 - 50MeV以上のプロトン=高エネルギー中性子と同じふるまい。核反応でソフトエラーが起こる。
 - ただしこちらでも複数エネルギーでの結果のワイブルフィッティング



ワイブルフィッティング
JESD89Aより



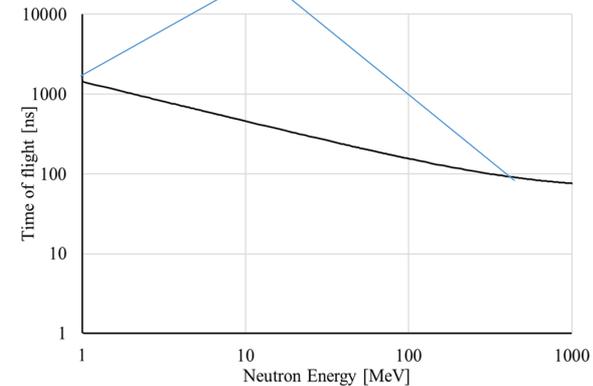
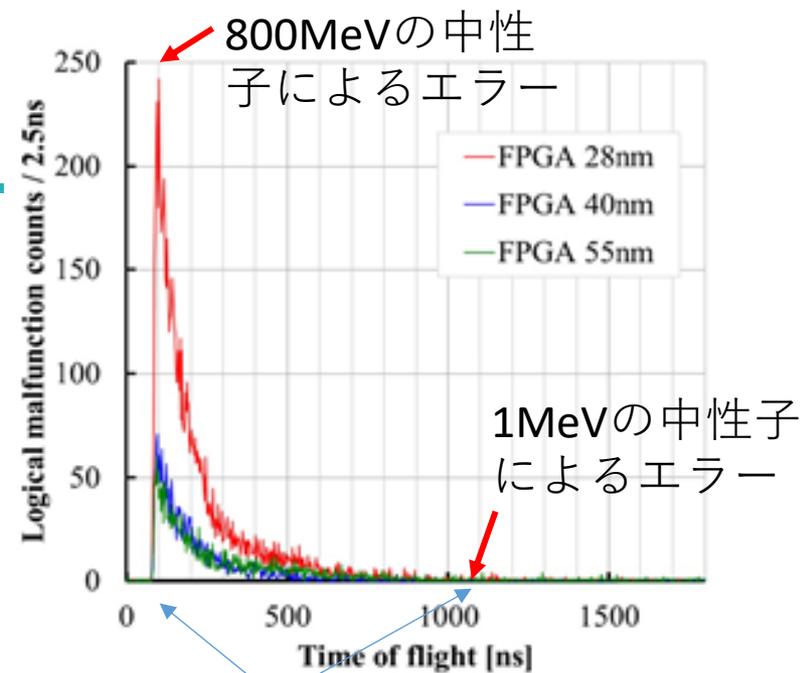
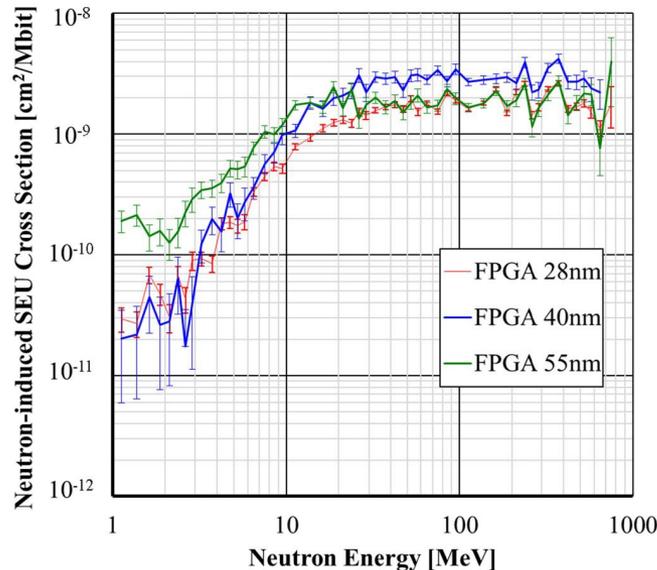
白色(WNR)と準単色の
合わせ込み(JEDEC)結果

[doi: 10.1109/TNS.2004.839135]

NTTらの報告

- エネルギーによる速度差(TOF)を利用して, FPGA(プログラム可能なLSI)を用いてエネルギーごとの衝突断面積(CS)を実測評価
 - 10MeV以上のCSはほぼ一定
 - 白色で測らなくてもOK?

CS=エラー数/粒子数



H. Iwashita et.al, IEEE TNS, VOL. 67, NO. 11, pp. 2365-2369, Nov. 2020

プレスリリース <https://research-er.jp/articles/view/94292>

Youtube動画: <https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=nPWsmpF9qiY&feature=youtu.be>

重イオン試験

● 要加速器

- 高崎量子応用研究所のTIARA、東北大学CYRICを利用
- 大気照射も可能だが、チャンバーに入れて真空状態でイオンを照射

● 重イオンは荷電粒子のため、LSIへの照射で多数のエラー発生

- 中性子はSi原子との衝突要
- 宇宙用半導体, ソフトエラーに強靱な回路の評価用
- QSTの予算削減でビームタイム大幅減…

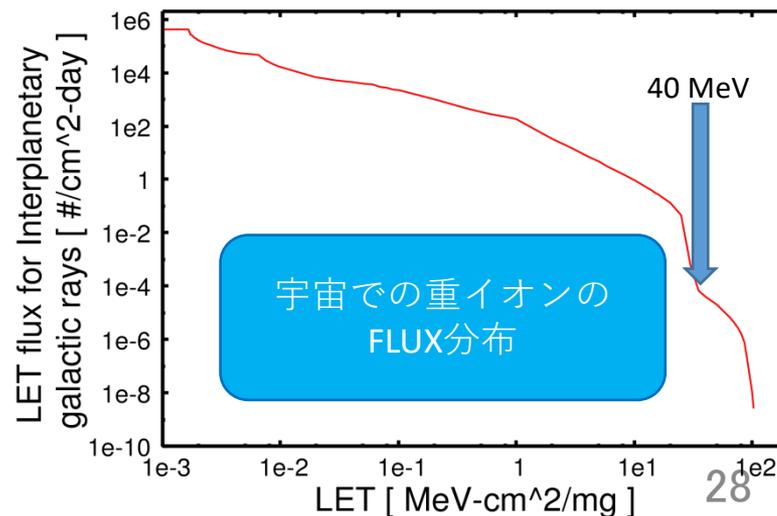


測定対象LSI



JAXA所有の90cm大口徑チャンバー@高崎

Heavy Ions	LET [MeV/ (mg/cm ²)]	Energy [MeV]
N	3.4	56
Ne	6.6	75
Ar	16	150
Kr	40	322
Xe	64	454

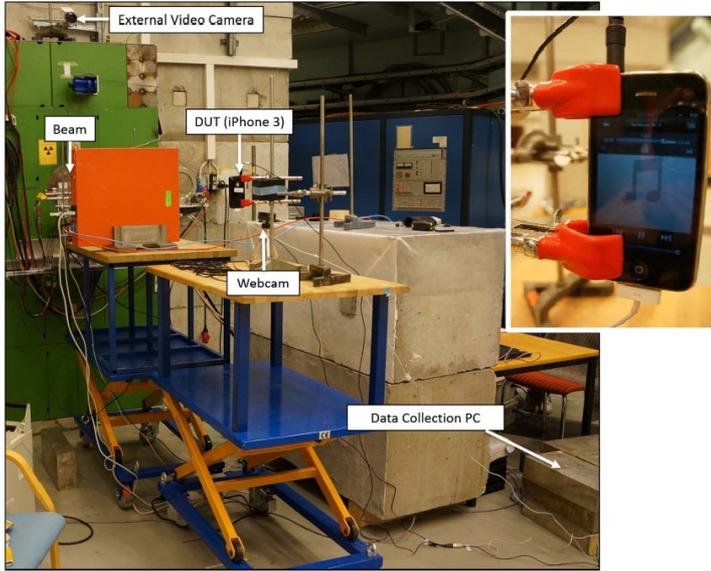


講演内容

- ソフトエラーと集積回路 (LSI)
- ソフトエラーの実例紹介
- ソフトエラーの実測方法
- **電子機器のソフトエラー実測結果**
- まとめ



スマートフォン測定結果



- 米国の高校生がCISCOのサポートで実施
- MTTF (平均故障時間):
 - 地上だと2000年に一度
 - 飛行高度(10,000m)だと4年に一度
- 500名が乗る12時間のフライトでは, 6フライトに1度発生

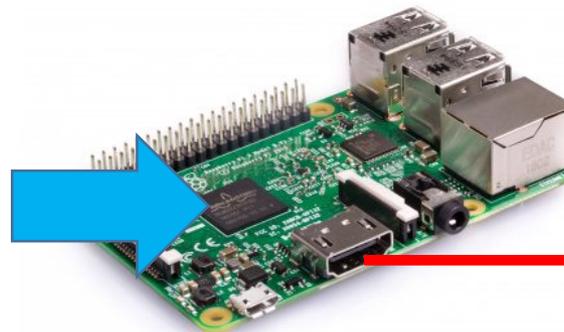
DUT	# of events	MTTF (y) at sea level	MTTF (y) at 35 kft
iPhone3	5	6000	20
iPhone3s	8	2000	4
Blackberry	11	2000	6

[Y. Chen, "Cosmic Ray Effects on Personal Entertainment Applications for Smartphones", REDW (2013)]

ラズパイに中性子を当ててみました

- ラズパイ: Raspberry Pi. 教育用としても使える安価な組み込みコンピュータ
- 組み込みコンピュータへの影響を評価するため
- 起動時に自動的にプログラムを走らせる
 - Decode mp4 video in an infinite loop
 - Compute multiplication of 32bit x 32bit random integers
 - Browsing (遠隔操作)
- HDMIケーブルで画面を録画

Spallation Neutron
Beam $\sim 10^8 \times$ Acc.



Raspberry Pi 3 (From raspberrypi.org)

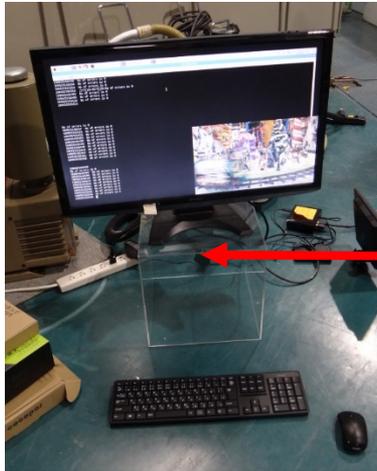


HDMI to USB Thumb Drive Recoding Box
(From www.century.co.jp)

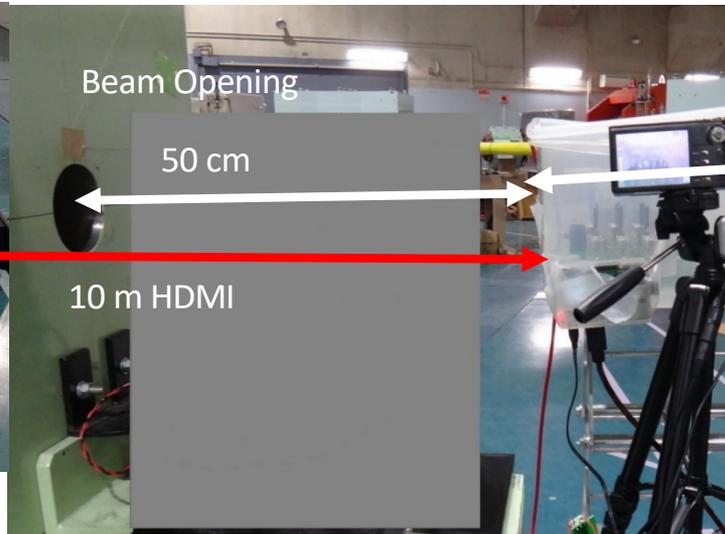
RCNPでの中性子実験



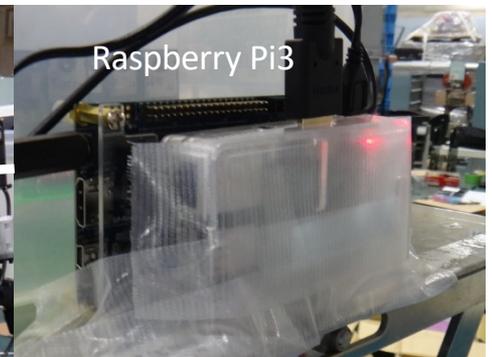
HDMI to USB Thumb Drive Recording Box
(From www.century.co.jp)



Display, Keyboard, Mouse
HDMI recorder



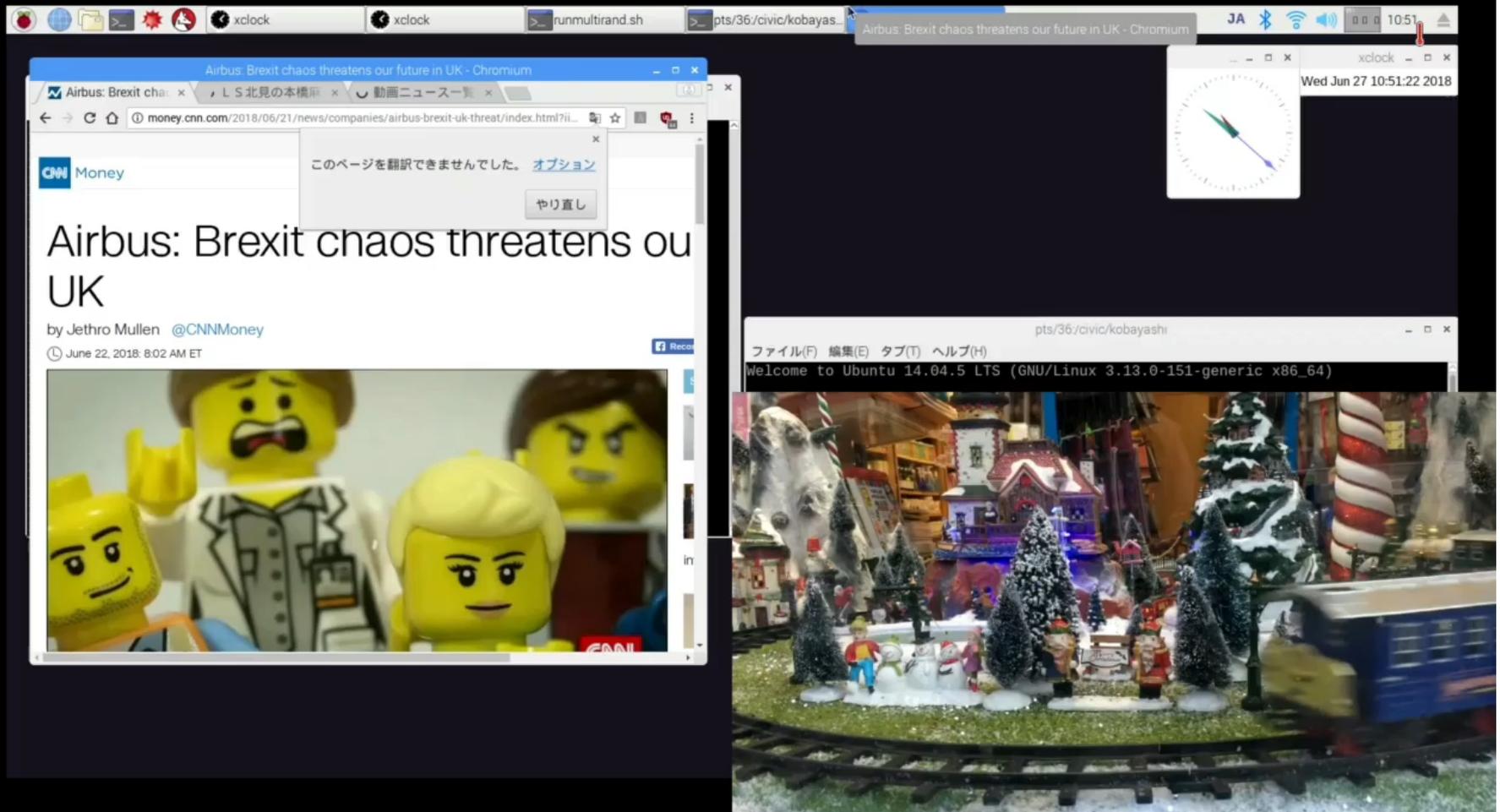
Beam opening, FPGA/ Raspberry Pi



- 中性子線量: $(2.189e9 \text{ n/cm}^2/\text{h at RCNP}) / (14 \text{ /cm}^2/\text{h at NYC}) = 1.56e8$
- ディスプレイ, HDMI録画機, キーボード, マウスは10mケーブルで低中性子線量区画に



加速試験での誤動作事例



(動画)

システムダウン事例

• 4つの事例

前ページの例

Elapsed	EX1
1:22	Video freeze
4:27	Browser Crash
7:12	Multiplication error
10:12	Stop Wifi, Clock skew, Shell script err.
10:38	Terminal Crash
13:52	X-window freeze (System down)

Elapsed	EX2
2:36	Multiplication stop
5:07	Video freeze
10:02	X-window freeze (System down)

Elapsed	EX4
4:39	Multiplication error
10:24	X-window freeze
15:39	Video freeze

Elapsed	EX3
1:59	X-window freeze
2:43	System down

最長動作時間: 939 秒 at RCNP= 地上では5000年

- 平均故障時間: 227秒. 338kFIT/Pi. 100万個のPiなら1日1個のエラー
- ただし, **動作クロック周波数は加速できない**ので, 地上でのFITはこれよりは小さいはず.

まとめ

- 集積回路 (LSI) 内の記憶素子は宇宙からの中性子, パッケージ (LSI の入れ物) からの α 線により反転 (ソフトウェア) することがある
 - 自動運転, スーパーコンピュータでは大きな問題
 - 日常の一時故障のほとんどはソフトウェア起因
- 白色中性子は, 集積回路のソフトウェアを測定するために必要
 - 世界で数箇所しかなく, 日本では阪大RCNPのみ
 - 準単色中性子の結果をワイブルフィティングすることで代替化
 - 宇宙用のLSIは重イオンで測定することも





ご清聴ありがとうございました