



# 中性子線による電子機器の ソフトウェア

京都工芸繊維大学  
電気電子工学系 教授  
小林和淑

# 講演のきっかけ

---

- 7月末の酒井先生よりのメール

- 「群馬大学 重粒子線医学研究センターの酒井と申します。突然のご連絡、失礼いたします。本学では重粒子線(炭素イオンビーム)を用いたがん治療を行っておりますが、その中で、**重粒子線照射によって生じる中性子がペースメーカーや植え込み型除細動器に影響を与える可能性について検討したい**と考えております。しかしながら、中性子が電子デバイスに与える影響について専門知識が無く、まずは先生のお話をお伺いできないかと思い、ご連絡を差し上げました。」

- 8月上旬に一度オンライン打ち合わせ

- 私のことはインターネットでたまたま見つけていただいたとのこと
- 重粒子線治療とソフトウェアについて情報交換



# 自己紹介

---

## 略歴

- 京都大学工学部電子工学科卒業(1991/03)
- 京都大学大学院工学研究科電子工学修了(1993/03)
- 京都大学大学院工学研究科電子工学科, 情報学研究科通信情報システム専攻助手(1993/04-2001/03)
- 京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻助教授/准教授(2001/04-2002/03, 2004/04-2009/03)
- 東京大学大規模集積システム設計教育研究センター助教授(2002/04-2004/03)
- 京都工芸繊維大学電子システム工学専攻教授(2009/04-)

## 研究活動

- 集積回路の設計と評価
  - 一時故障に強靱な回路 (宇宙, 自動車, スーパーコンピュータ向け)
  - 経年劣化の評価とその対策 (自動車等の長期使用を前提とした回路向け)
- パワーエレクトロニクス
  - SiCのMHz動作に向けた高速スイッチング用ゲートドライバ
  - GaN IC



# 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
- 放射線治療法と医療機器のソフトエラー (放射線による誤動作)
- 重粒子線でのソフトエラー
- まとめ

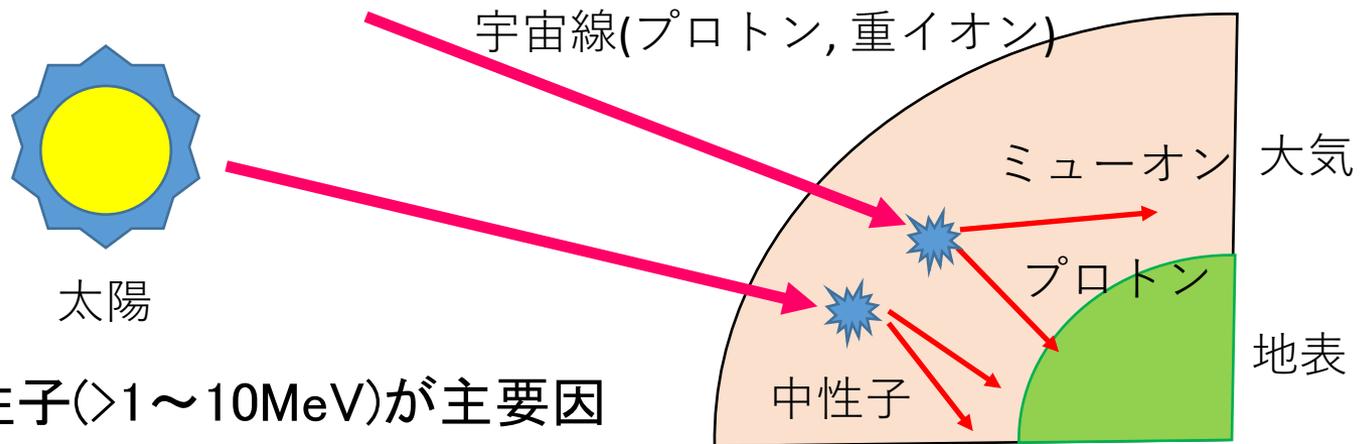


# ソフトウェアとは

- 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/cm<sup>2</sup>/h)
  - 高度10km(飛行高度)では地表の100倍に相当
- パッケージ(LSIの入れ物)中の放射性不純物からの $\alpha$ 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

- $\alpha$ 線, 中性子により発生
  - $\alpha$ 線はLSI周辺から発生. 低 $\alpha$ 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

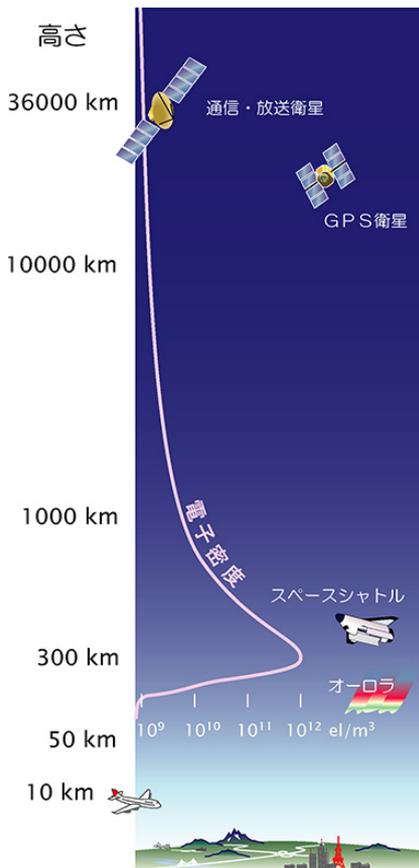
(熱圏)

電離圏

(中間圏)

(成層圏)

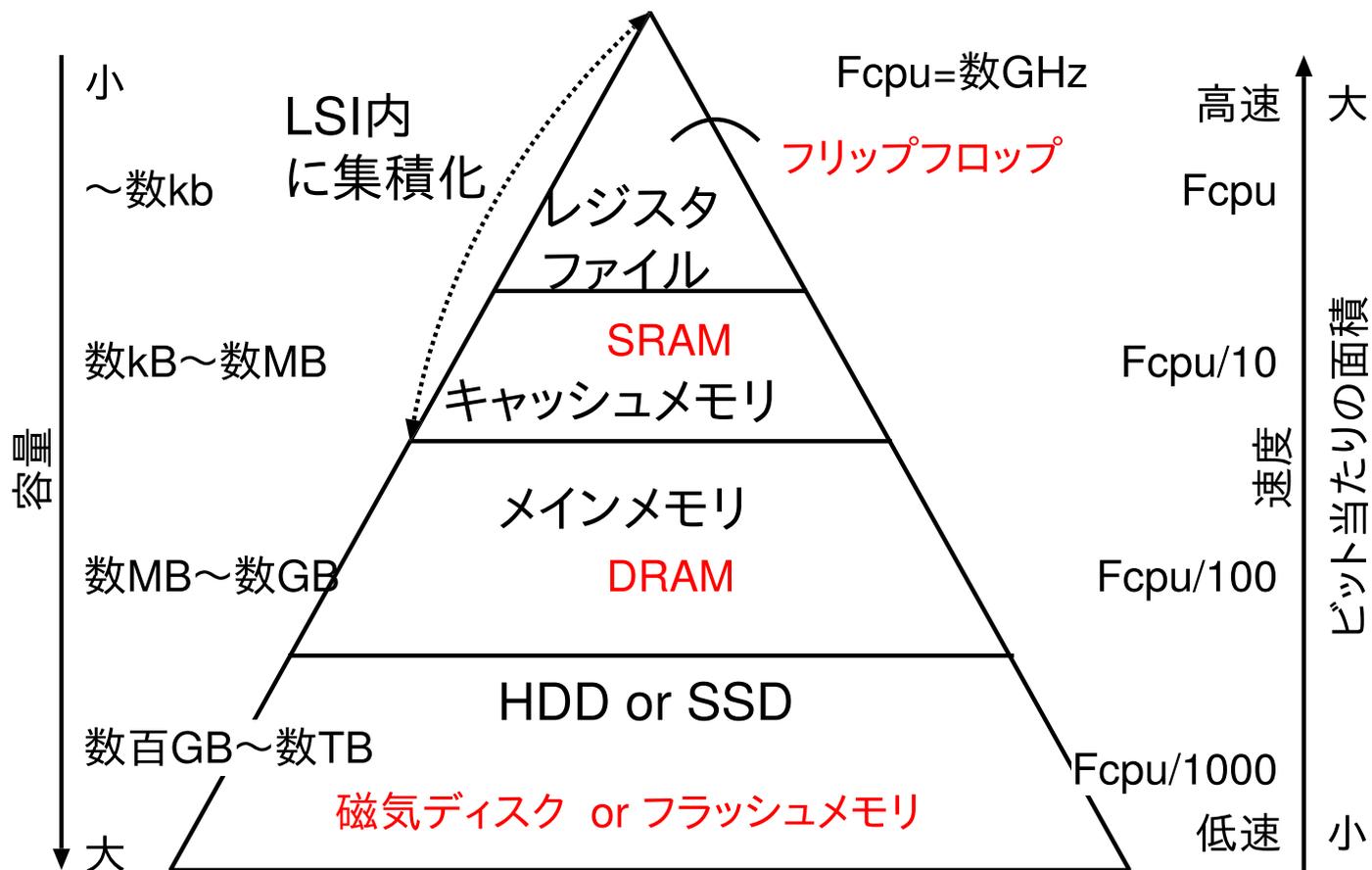
(対流圏)





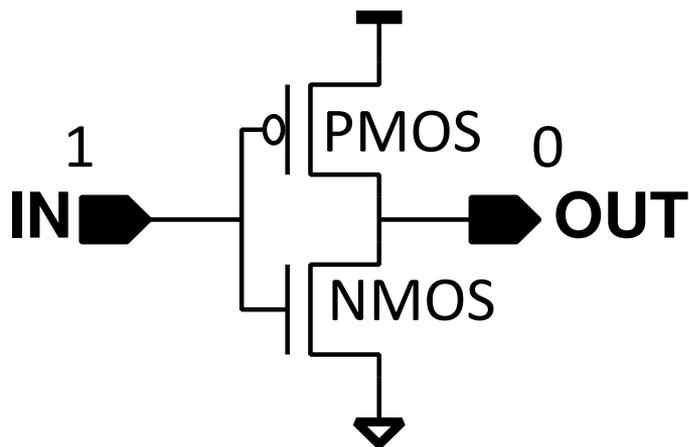
# 電子回路中の記憶素子

- 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SEUを起こす.



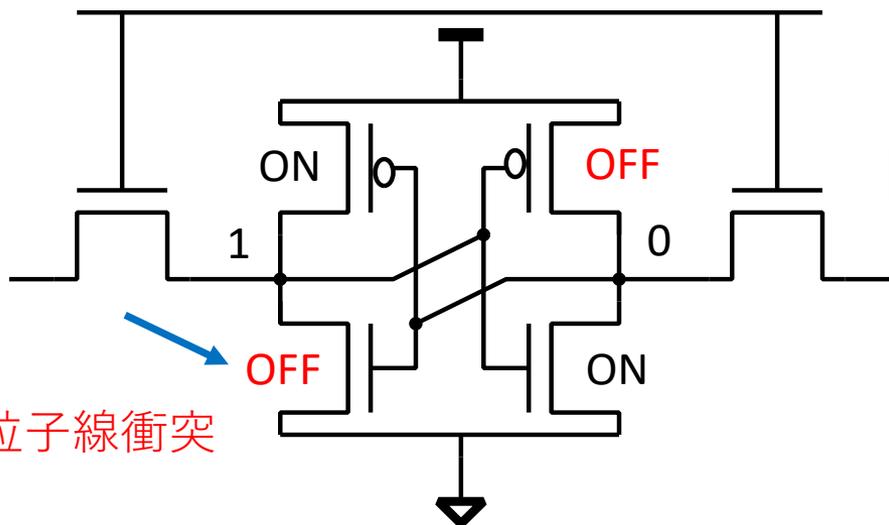
コンピュータの記憶階層

# CMOS論理ゲートとSRAMのソフトウェア



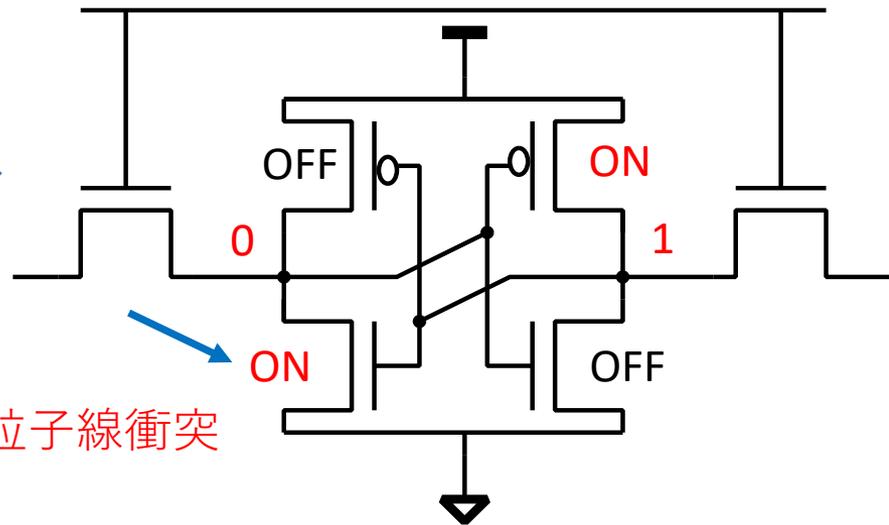
CMOSインバータ(NOTゲート)

- 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

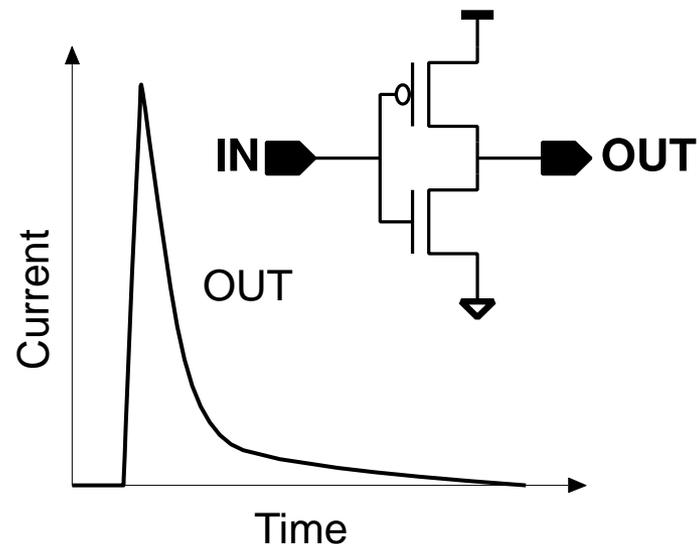
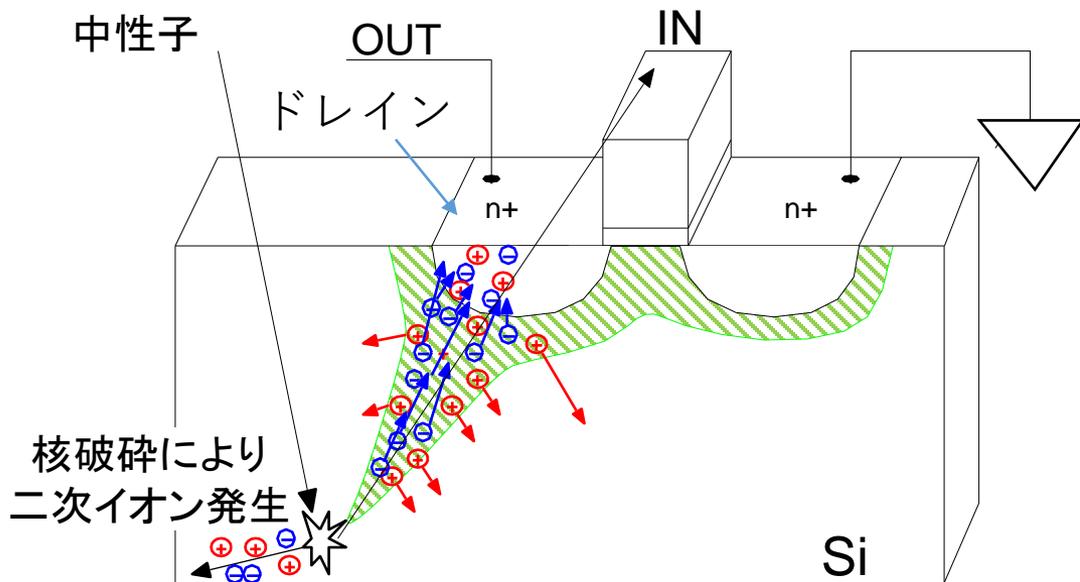
SRAM (Static Random Access Memory)



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

$n + {}^{28}\text{Si} \rightarrow \gamma + {}^{29}\text{Si}$   
 $\rightarrow n + {}^{28}\text{Si}$   
 $\rightarrow p + {}^{28}\text{Al}$   
 $\rightarrow n + p + {}^{27}\text{Al}$   
 $\rightarrow {}^3\text{He} + {}^{26}\text{Mg}$   
 $\rightarrow \alpha + {}^{25}\text{Mg}$   
 $\rightarrow n + \alpha + {}^{24}\text{Mg}$   
 $\rightarrow 2\alpha + {}^{21}\text{Ne}$   
 $\rightarrow \text{etc.}$

- 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

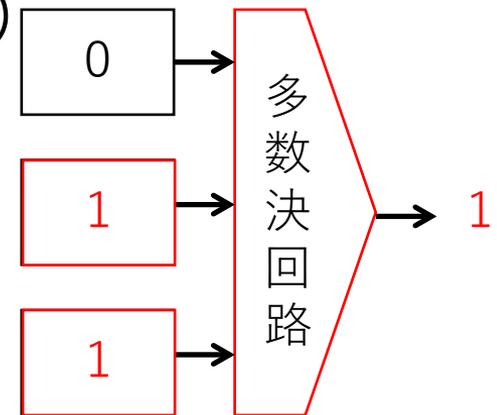
# 記憶素子(メモリ)のソフトウェアエラー対策

- 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
- 放射線治療法と医療機器のソフトエラー (放射線による誤動作)
- 重粒子線でのソフトエラー
- まとめ



# ソフトウェア？実体験

---

- ハワイ行きの飛行機

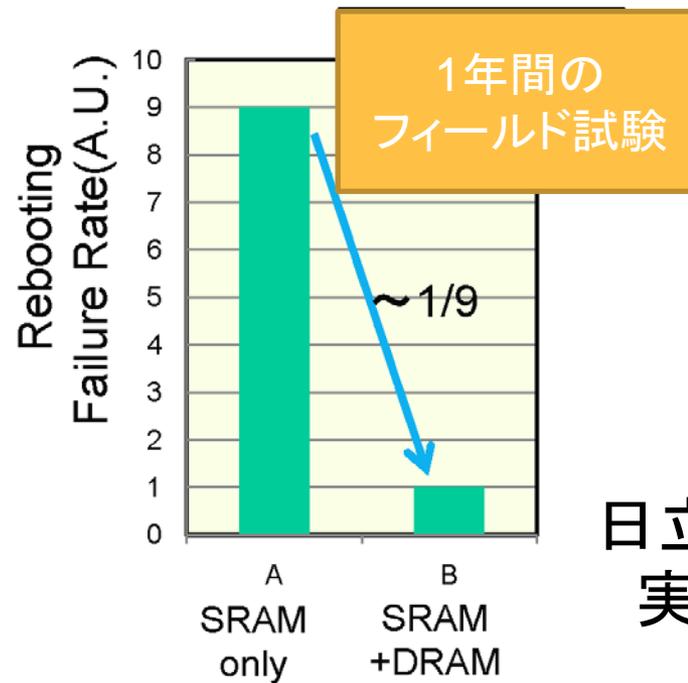
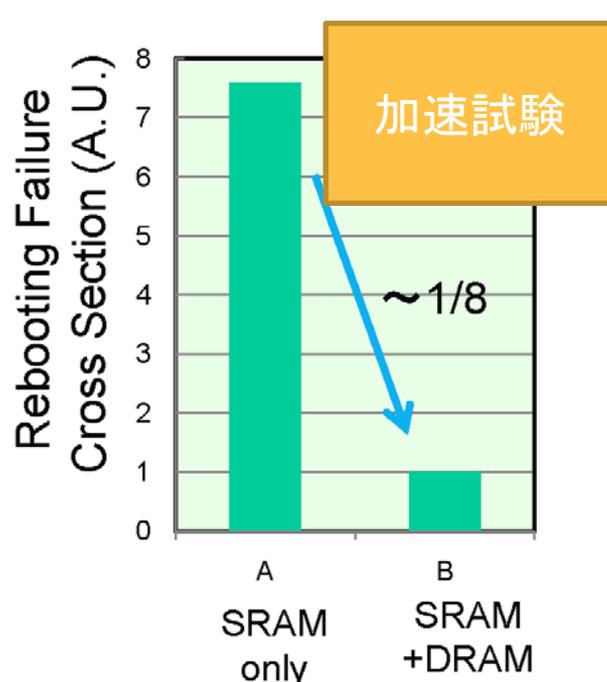
- iPod touch (初代)の、ボリュームが誤動作
- 再起動で復活

- 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 a search bar. To the right is an ESC (Electronic System Conference) logo for Farnborough, October 6-8, 2009. Below the logo is a navigation menu with links for Home, Research, Forums, Design, New Products, Careers, and Blogs. The main content area features the article title "SRAM soft errors cause hard network problems" by Anthony Cataldo, dated 08/17/2001. The article text begins with "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 text is a sidebar with social sharing 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



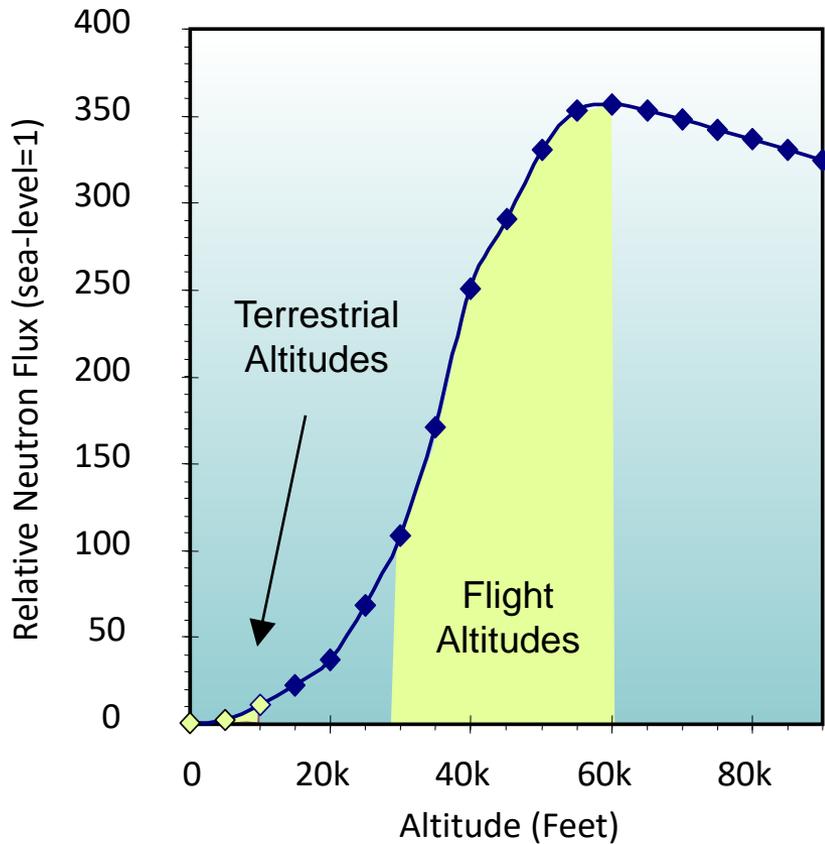
「88,128個のCPUなどから構成されるシステム全体が29時間28分にわたって無故障で動作したことは、世界最大級の超大規模システムの安定性を実証することになりました。」

(理化学研究所:広報活動 2011/11/2)

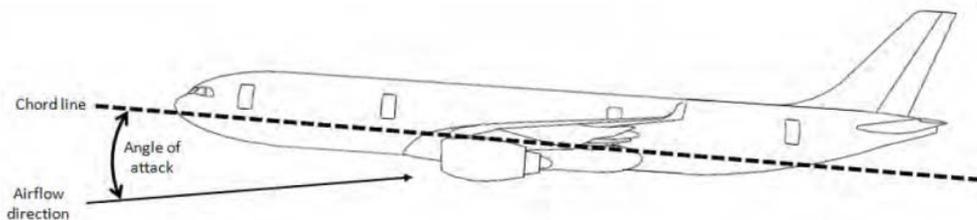
- 京コンピュータではシングルイベントが**数十分に1回**発生
  - 京コンピュータ全体でSRAM 4.4Tbit SRAM
  - 100倍の耐性または99%のエラー検出でようやく1日稼働
  - ハード・システム・OS全てでソフトウェア対策



# 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(10<sup>9</sup>時間あたりの故障数)
    - 1000FIT: 10<sup>6</sup>時間(114年)で1回故障. **100万(10<sup>6</sup>)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	<b>&lt;10</b>	自動運転向け

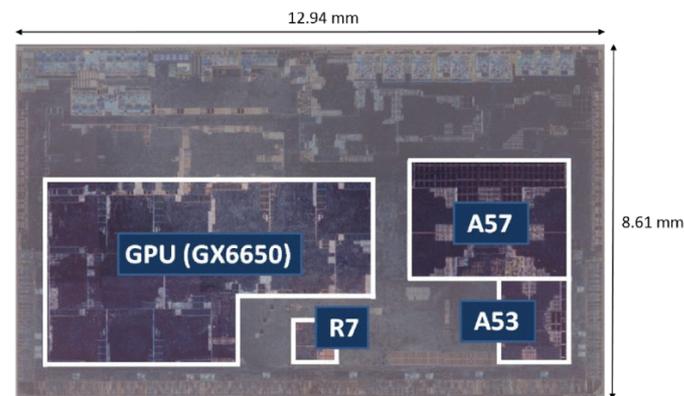
- 無対策では、集積回路ひとつあたり、10万FIT=1年に1回故障

## 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ー率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
Size	12.94 mm x 8.61mm, 111.36mm <sup>2</sup>
Memory	LPDDR4-3200

CPU	Quad Cortex-A57 2.0GHz
	Quad Cortex-A53 1.2GHz
	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
- 放射線治療法と医療機器のソフトエラー (放射線による誤動作)
- 重粒子線でのソフトエラー
- まとめ



# ソフトウェアの実測方法

---

## • フィールド試験

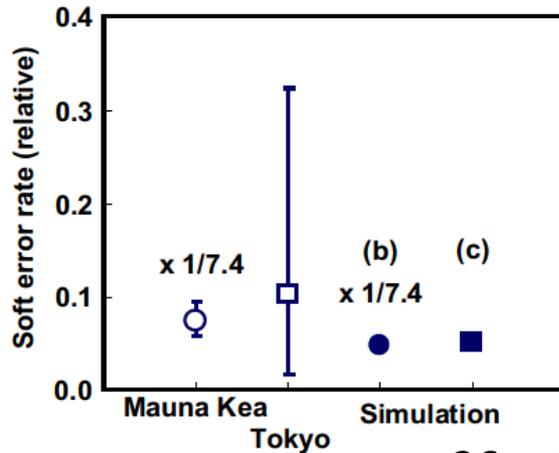
- 地上や高い山に多数のデバイスを並べてソフトウェアを実測
  - ハワイのマウナケア
- 実データが取れるが、時間と多数のデバイスが必要
  - 日立の例： 1年間

## • 加速試験

- 単位時間あたりの粒子線数(フラックス)を加速
- $\alpha$  線：  $^{241}\text{Am}$ . 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)



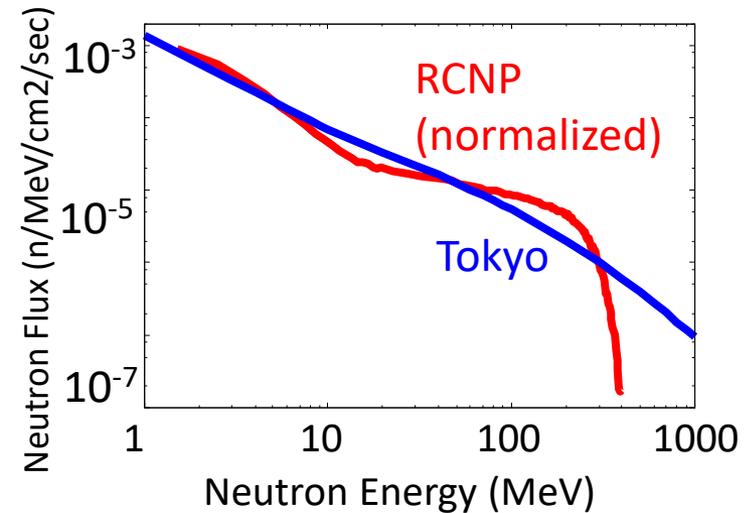
36 soft errors / 100 days

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

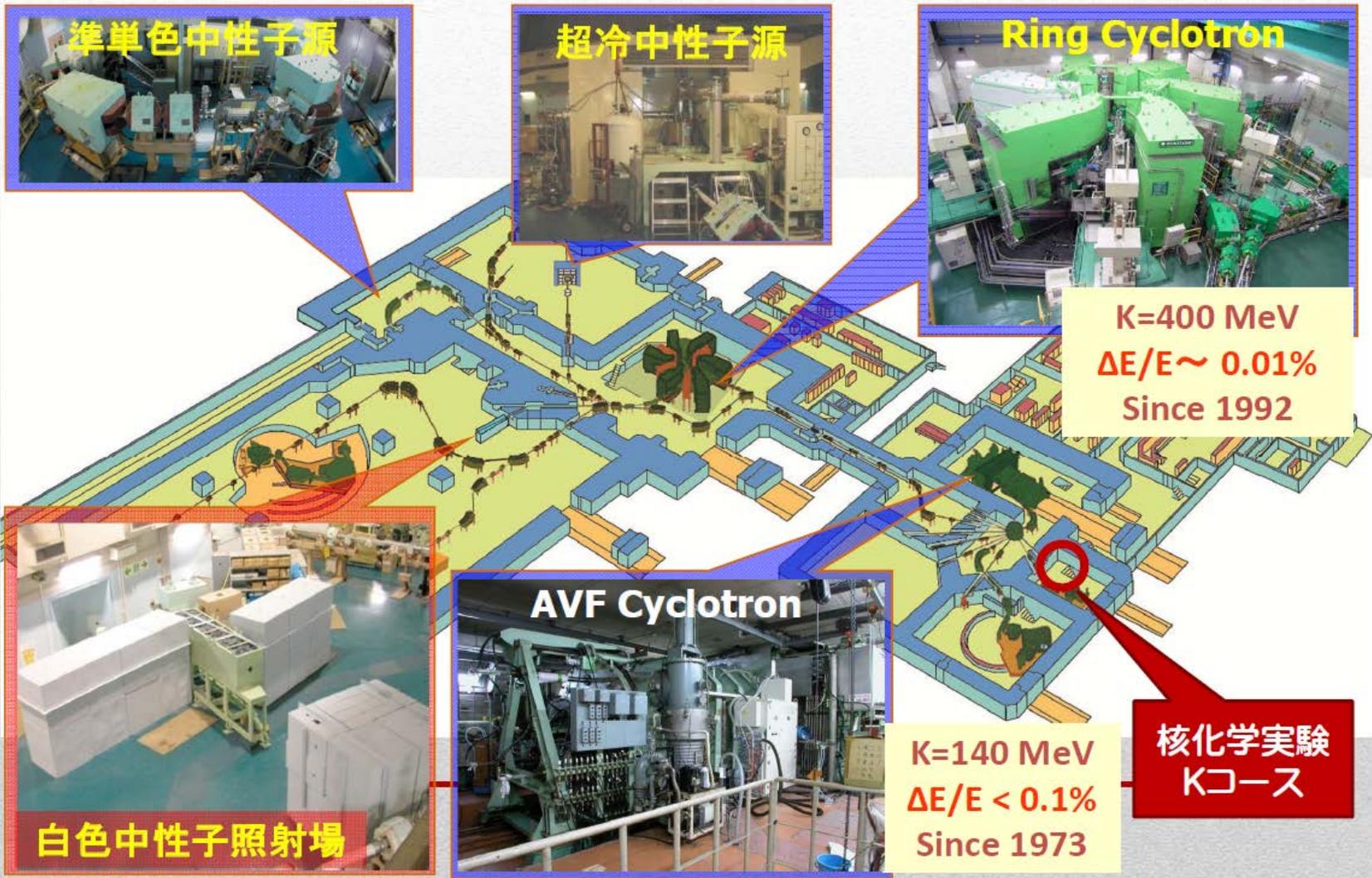
- 白色中性子を利用
  - 大阪大学RCNP(核物理研究センター)の加速器
  - 1時間で10万年分(約 $10^8$ に加速)
- “白色”=地上と同等のエネルギースペクトル
  - 特定のエネルギー付近にピークを持つ“準単色”ビームもあり(東北大CYRIC)
- 中性子は遮蔽困難(数mのコンクリート等)のため、測定に工夫必要



白色中性子源の中性子スペクトラム

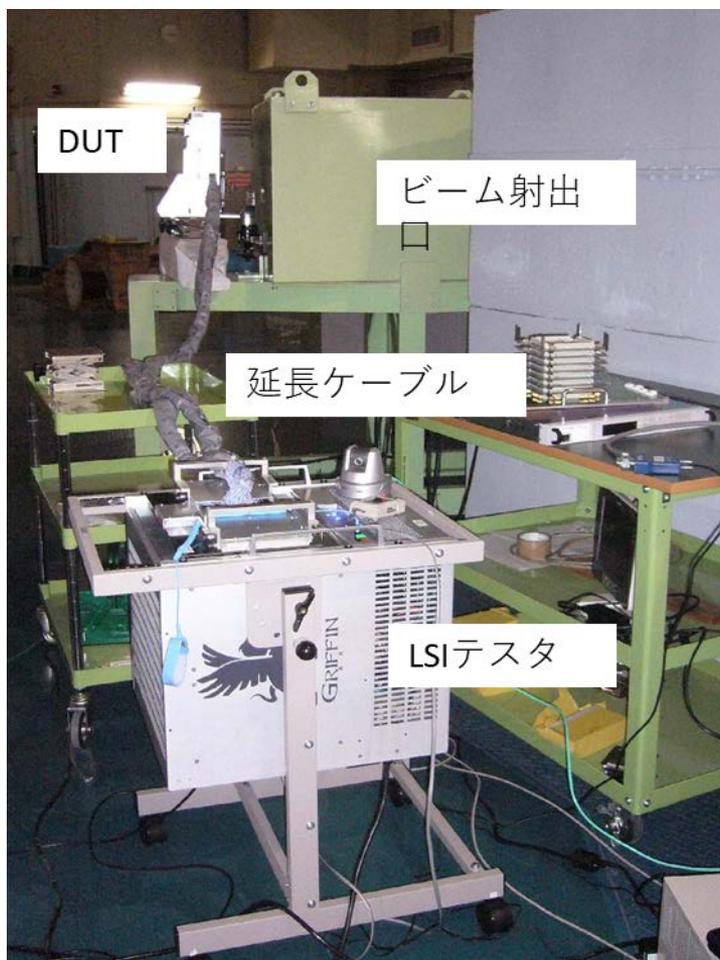
# RCNPサイクロトロン施設

RCNP福田先生資料より



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



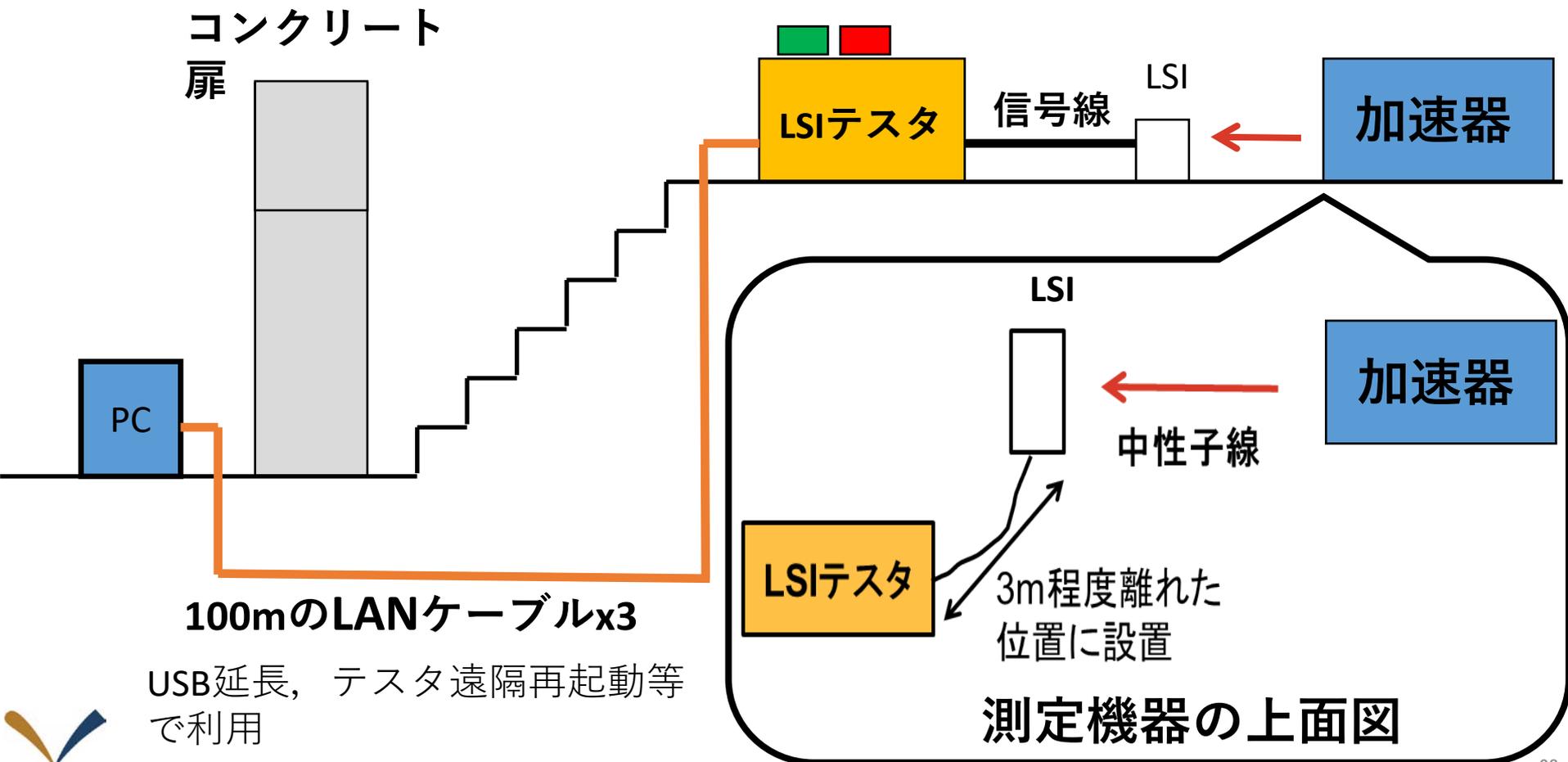
- 可搬型LSIテスタにより実施
  - LSIテスタ: LSIの動作試験を行う測定機器 (価格は一軒家程度)
- ビーム射出口直後に測定器はおけない
  - 測定器がソフトウェアで誤動作
  - 4m離す治具を作成
  - 要 暫時再起動 → リモート電源遮断装置
- PCは実験室外
  - 最先端LSI多数のため、すぐにおかしくなってしまう
  - USBをLANケーブルに変換
- 測定器の電源が中性子による焼損 (シングルイベントバーンアウト、SEB) を起こし壊れることもあり



# 中性子実験セットアップ

観測室

実験室



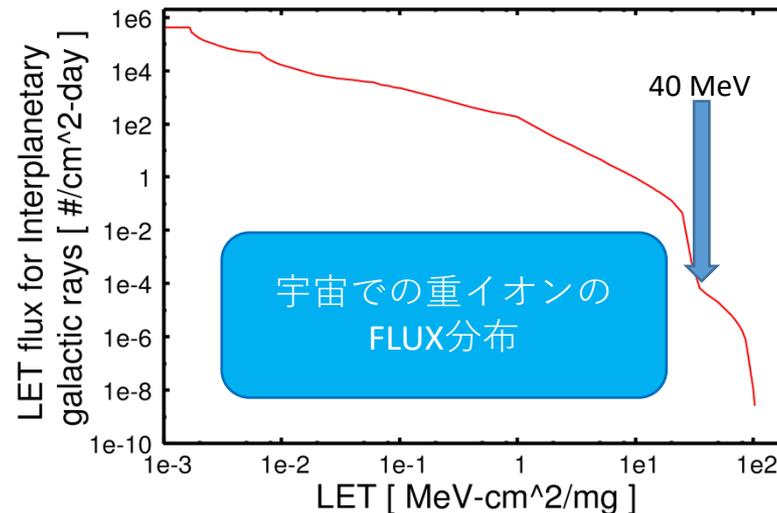
# 重イオン試験

- 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



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

TIARAのカクテルビームからのイオン種



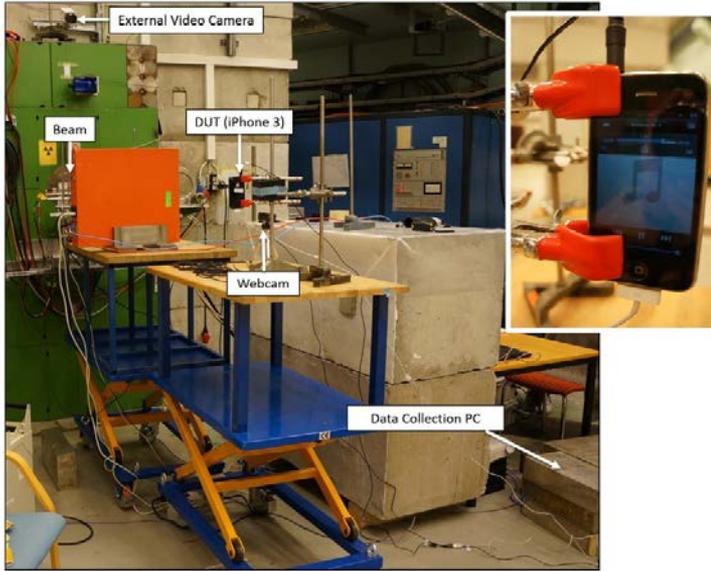
# 講演内容

---

- 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**
- 放射線治療法と医療機器のソフトエラー (放射線による誤動作)
- 重粒子線でのソフトエラー
- 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

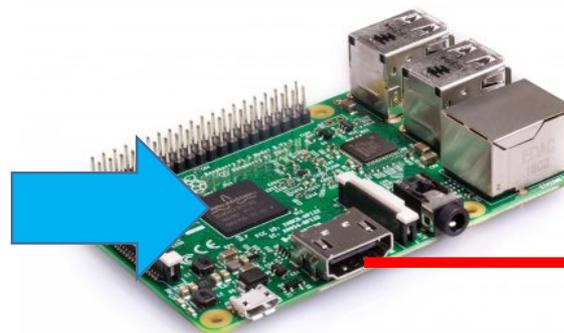
DUT	# of events	MTTF (y) at sea level	MTTF (y) at 35 kft
iPhone3	5	6000	20
iPhone3s	8	2000	4
Blackberry	11	2000	6

[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



HDMI to USB Thumb Drive Recoding Box  
(From [www.century.co.jp](http://www.century.co.jp))



# RCNPでの中性子実験



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





# 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.



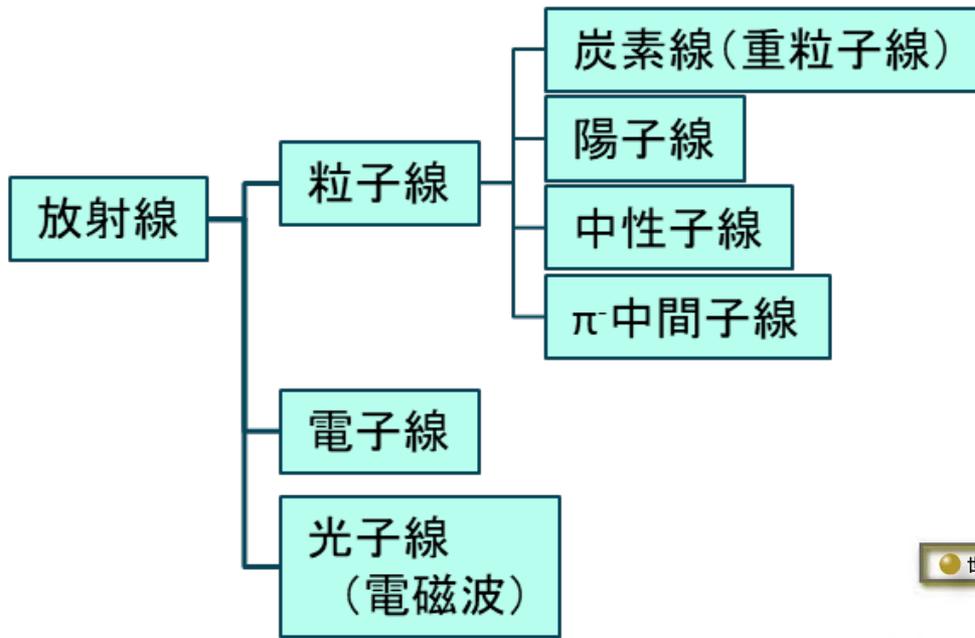
# 講演内容

---

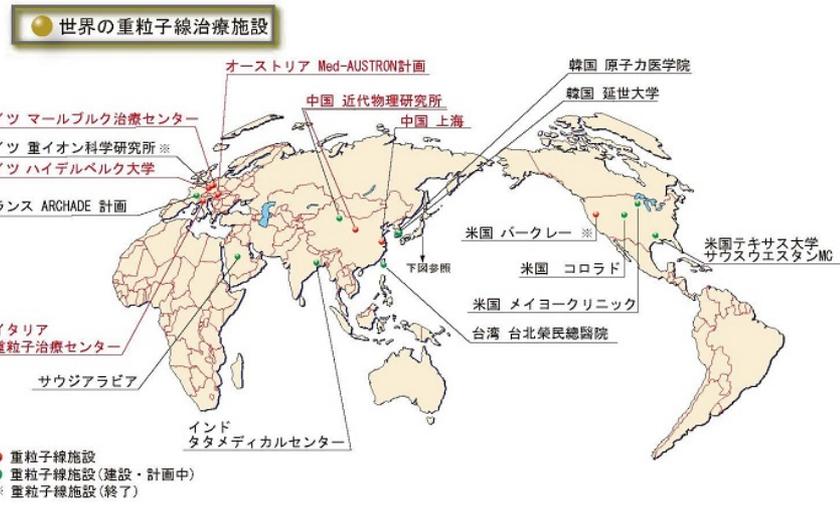
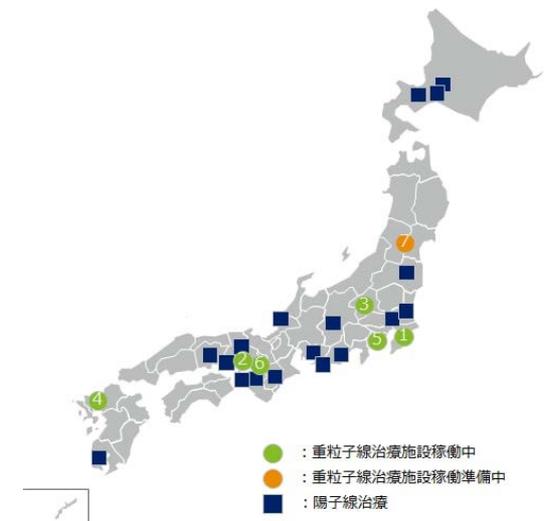
- ソフトエラーと集積回路 (LSI)
- ソフトエラーの実例紹介
- ソフトエラーの実測方法
- 電子機器のソフトエラー実測結果
- **放射線治療法と医療機器の放射線による影響**
- 重粒子線でのソフトエラー
- まとめ



# 放射線治療の種類（酒井先生より）



粒子線治療では主に陽子線と炭素線が用いられており、炭素線治療は重粒子線治療とも呼ばれている。  
 コスト等の問題により、世界的には陽子線施設が多く、米国では炭素線施設はまだ建設されていない。



# 医療機器の放射線の影響(蓄積効果)

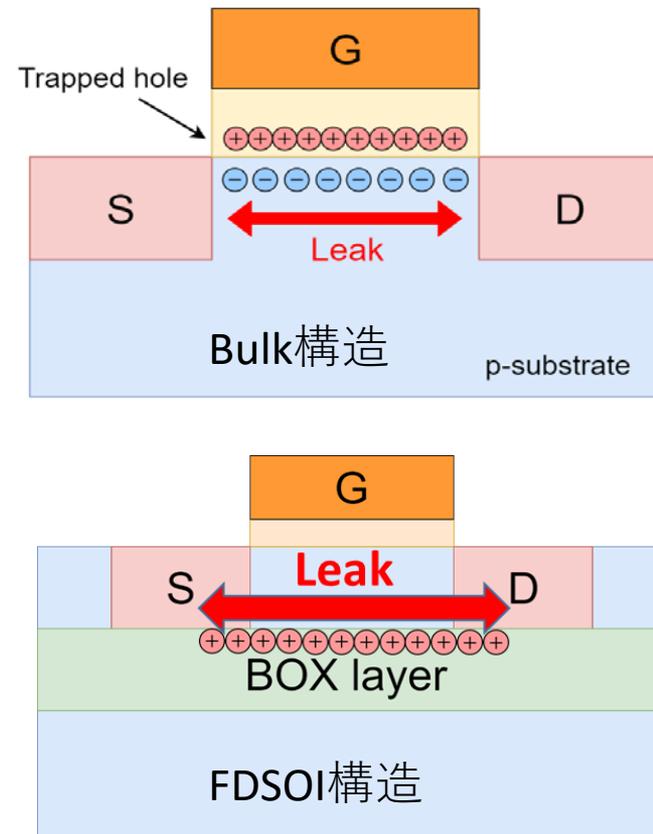
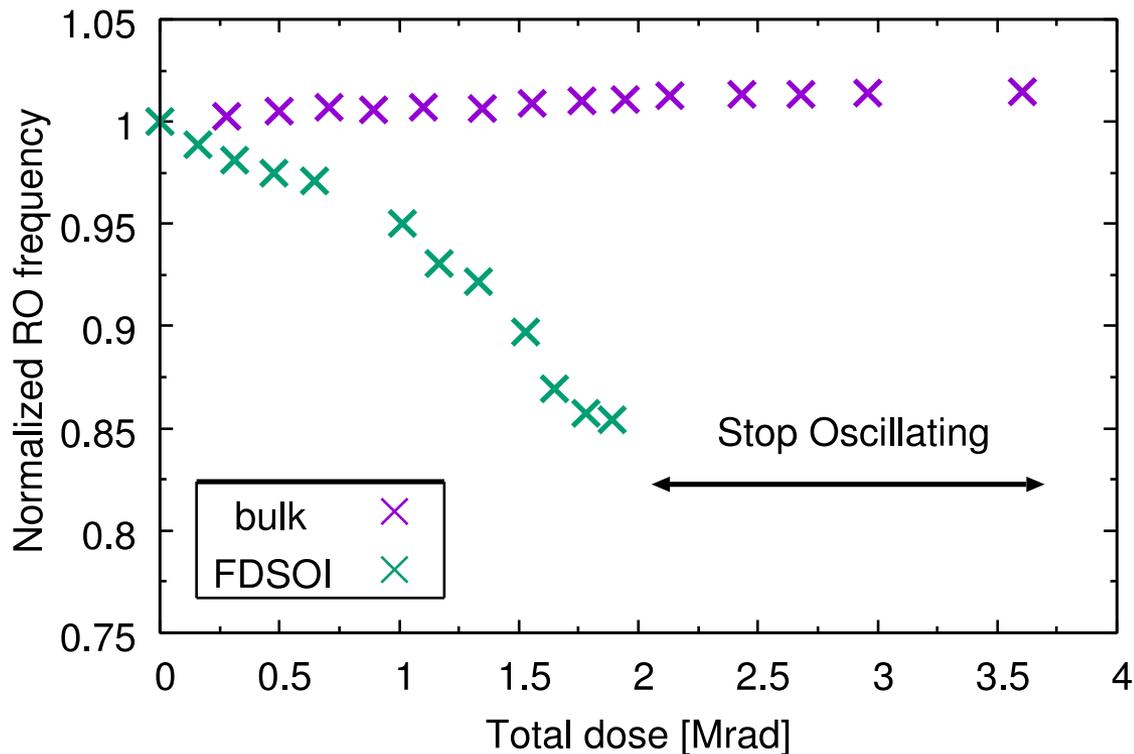
“Management of radiation oncology patients with a pacemaker or ICD: A new comprehensive practical guideline in The Netherlands”, [Radiation Oncology](#) volume 7, Article number: 198 (2012)

ペースメーカー、除細動器を埋め込んだ患者さんに対する放射線治療

- Modern CIEDs contain Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) technology. The CMOS technology developed in the early nineties was more radiosensitive than the previously used bipolar transistors (TTL technology). However, CMOS technology has rapidly developed and currently is much more radioresistant. It is for example routinely used for aerospace applications requiring a tolerance up to several thousand Grays.
  - バイポーラトランジスタからCMOSへの置き換えでCIED(ペースメーカー、除細動器)は放射線に敏感に。数千Gyに耐える宇宙用部品を使うことで放射線耐性が向上
  - ここで言う放射線耐性はTID(Total Ionizing Doze)と呼ばれる蓄積効果



# 蓄積効果 (TID) の測定結果一例



## • 我々の実測例

- 発振器(RO)にガンマ線を照射. 1Mrad=10kGy
- よく使われるbulk構造では, 4Mrad(40kGy)でも問題なく動作. 腕時計などの**低電力機器**に使われるFDSOIはTIDに脆弱. それでも重粒子線治療の数十Gyは問題ないレベル



# 医療機器の放射線の影響(ソフトウェアその1)

“Cancer-radiotherapy equipment as a cause of soft errors in electronic equipment”, **J. D. Wilkinson** (Medtronic) et.al, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2005

LINAC (Linear Accelerator) を使った放射線治療で発生する2次中性子による電子機器のソフトウェア

- ここでのソフトウェア要因は熱中性子( $\sim 25\text{eV}$ )
  - 熱中性子は $^{10}\text{B}$ と衝突確率(衝突断面積)が高い
- この論文で使われているLSIは製造技術が古く,  $^{10}\text{B}$ が多く含まれるBPSG (Borophosphosilicate glass)を使用
  - 2005年時点でのLINACを使った治療機器周辺では結構使われていた.
- 現在の最新電子機器ではほぼ使われていない古い製造技術
- ただし, 最新の製造技術で再び $^{10}\text{B}$ が問題に

Exposure Condition	Device Minutes	Errors
50 cm, no shielding	30	3
50 cm, EMI shielding (sealed steel box)	10	1
50 cm, Thermal neutron shielding (2 cm dry boric acid)	20	0
10 m, outside treatment room	20	0

SRAMのソフトウェア数  
ホウ酸でシールドすると0に



# 医療機器の放射線の影響(ソフトウェアその2)

## “Runaway Pacemaker During High-Energy Neutron Radiation Therapy,”

CHEST, 1994

高速中性子を使った放射線治療でのペースメーカーの暴走

- With the incorporation of complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) integrated circuit technology, pulse generators have become more sensitive to injury from therapeutic ionizing radiation.
  - CMOS集積回路の使用により, (ペースメーカーの)パルス発生器が治療による放射線に敏感になった.
- The lowest radiation dose at which pacemaker dysfunction has been reported is 10 gray (Gy), and current guidelines mandate that pacemakers near or within a radiation field be shielded such that total exposure be limited to 2 Gy.
  - 10Gyで機能障害. 2Gyが現在のガイドライン
- This damage can be caused by a single particle, and result in resetting of CMOS integrated circuits.
  - CMOS集積回路がリセットされペースメーカーが暴走
- In our patient we chose to move the pulse generator to a position further away from the radiation field
  - パルス発生器を放射線から遠ざけた



# 講演内容

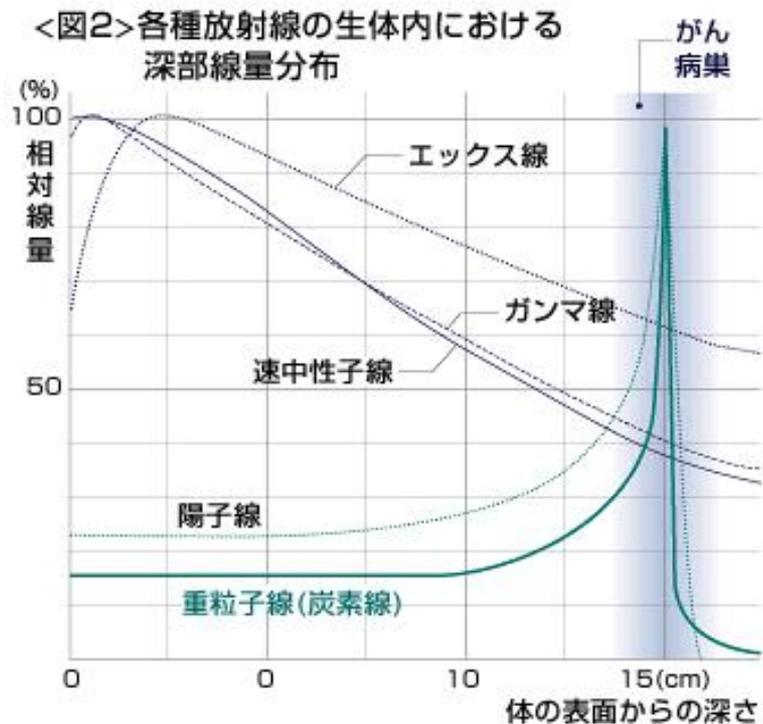
---

- 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
- 放射線治療法と医療機器の放射線による影響
- **重粒子線でのソフトエラー**
- まとめ



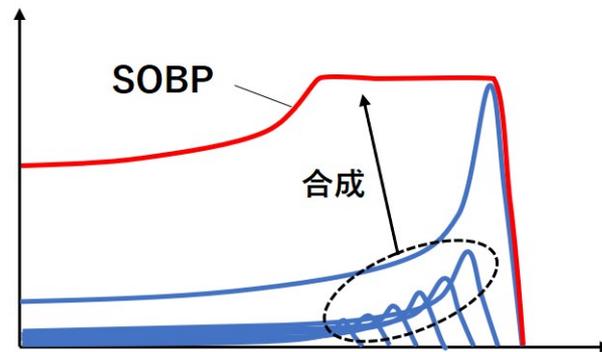
# 重粒子線治療の特徴

(酒井先生より一部改変)



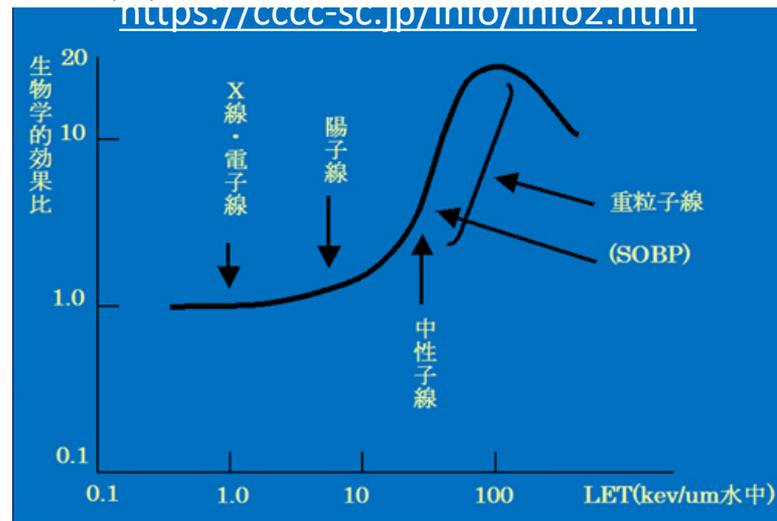
がん病巣にブラッグピーク(重粒子が止まるさいに最大エネルギーを放射)を持っていき、がん病巣のみを攻撃

重粒子線は陽子線に比べて側方散乱が小さい[出水2014]



SOBP: Spread-Out Bragg Peak  
ブラッグピークをシフトさせてピークを広げる

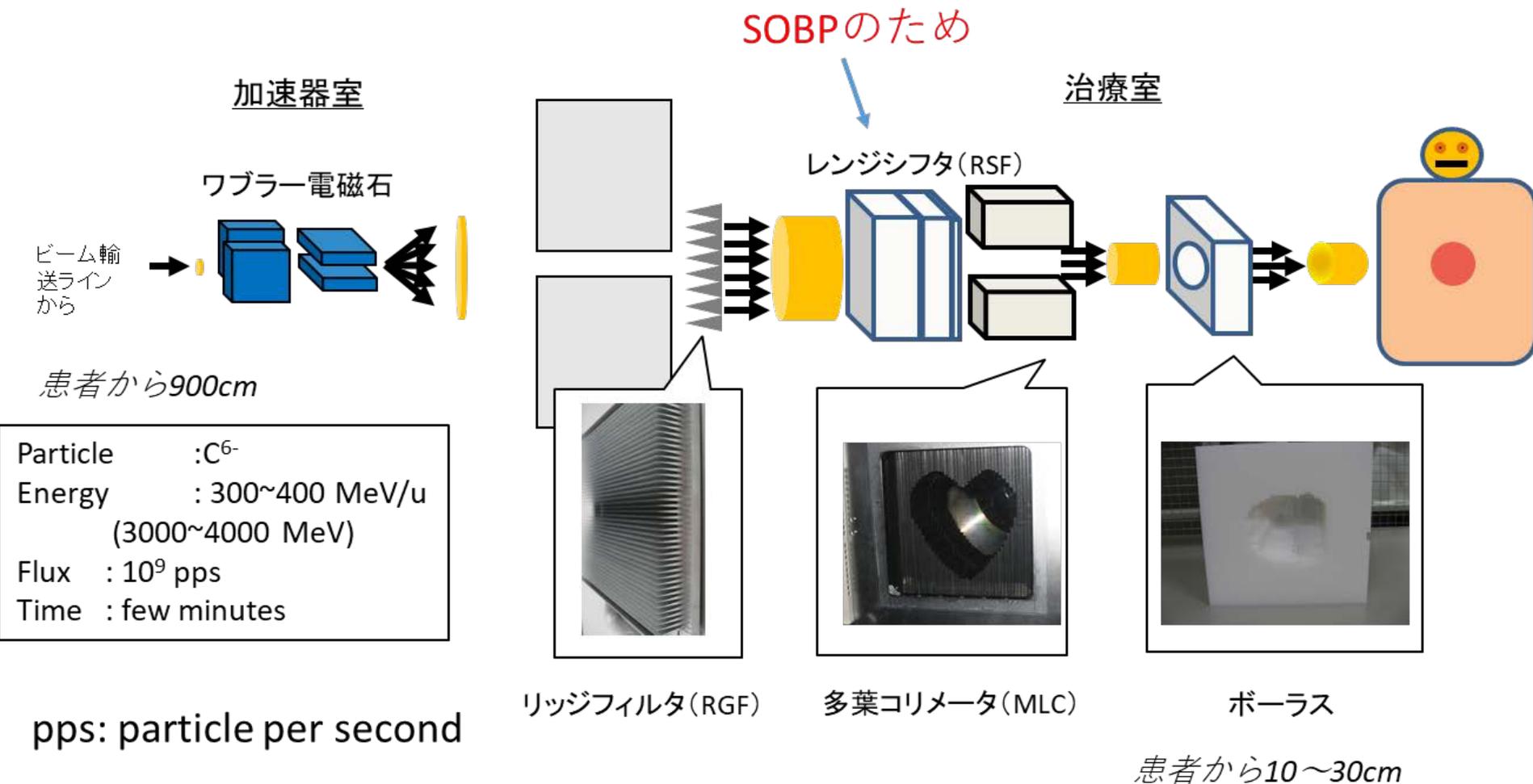
<https://cccc-sc.jp/info/info02.html>



重粒子線はLET値が大きく、生物により大きなダメージを与える

# 重粒子線治療装置(照射系)

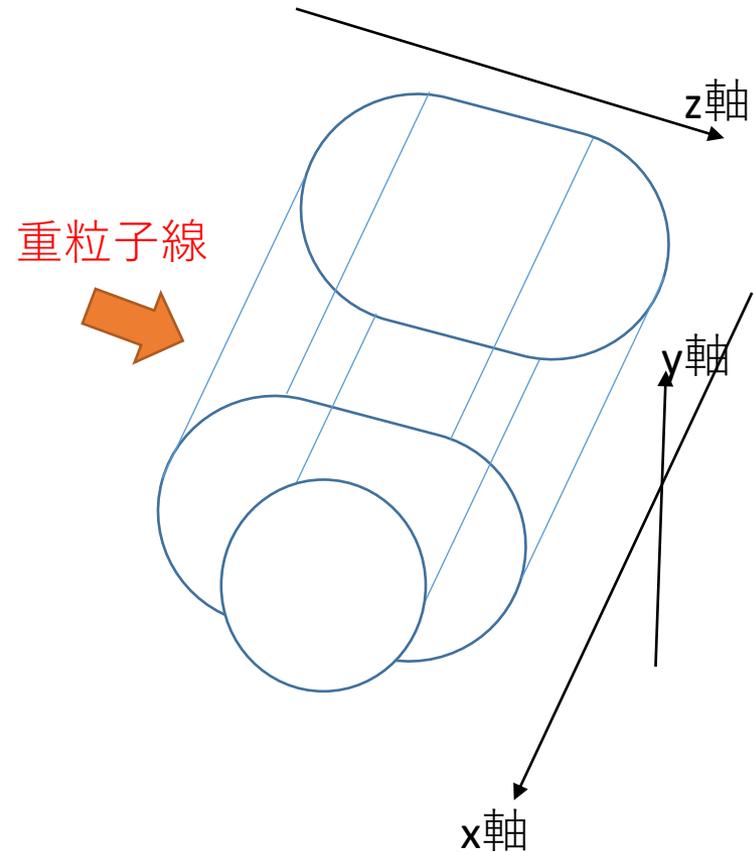
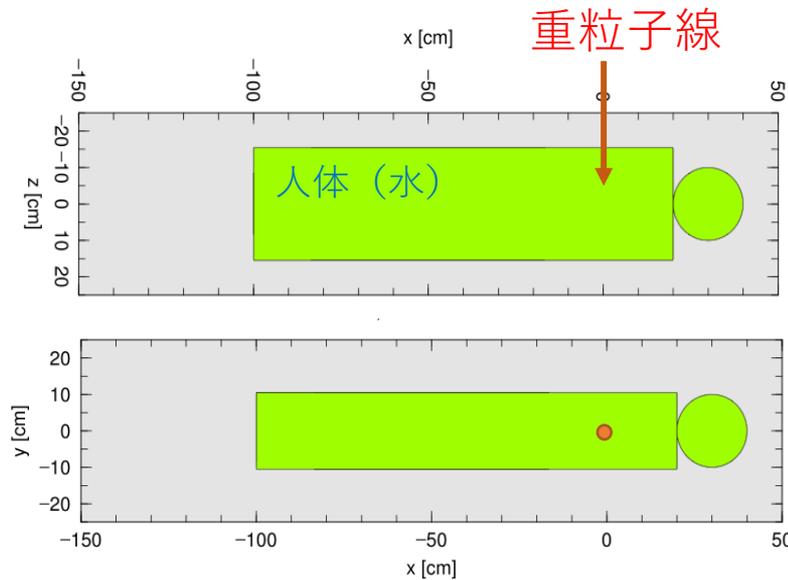
(酒井先生より一部追記)



# PHITSによるフラックス計算

(酒井先生より一部追記)

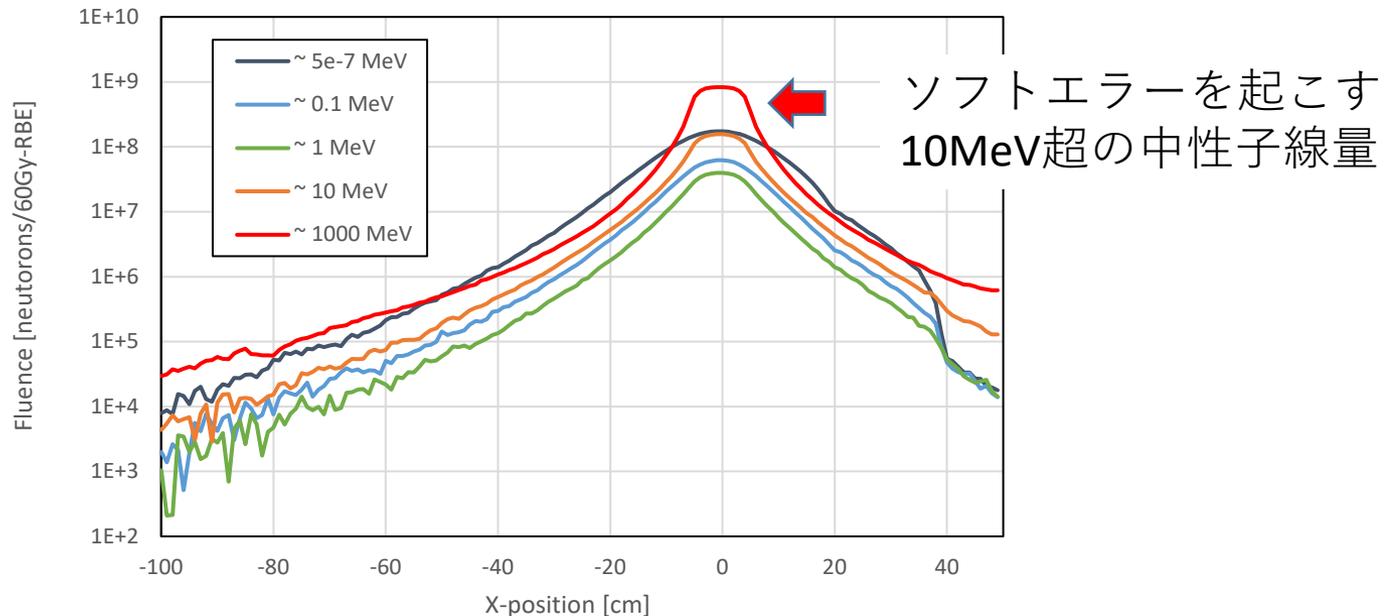
- PHITS: QST提供の核反応計算コード
- 人体を模擬したモデルを利用



- 頭部 : 半径10 cmの球
- 体幹部 : 直方体 (10x21x120 cm<sup>3</sup>) と半円柱(r=10.5 cm) 2つの組み合わせ
- 組成 : 水 (密度1)



# 重粒子線治療での中性子線量



60Gy照射時の中性子フラックス (酒井先生より)

- 一連の治療で60Gyを合計30分から1時間で照射
  - 1回あたり数分で2～7Gy. 6Gyとして3分
- 炭素線直下では,  $1e9 \text{ n}/60\text{Gy}/30\text{min} = 2e9 \text{ n}/\text{h} \doteq 2\sim 4e9 \text{ n}/\text{h}$  at RCNP
  - 白色中性子加速実験と同程度の中性子線フラックス
  - 10cmでも, 1桁落ち.



# ディスカッション

- ラズパイの平均故障時間: 224秒(動作停止までの時間). 通常は1分も経たずに「画面に見えるエラー」. ソフトエラー自体は頻繁に発生
- 100,000FITの電子機器: 1分で238個のソフトエラー@ $2e9n/cm^2 \cdot h$ 
  - ペースメーカーの寿命は10年程度
  - 10年無故障(10年で故障1回未満) $\div$ 100,000FIT
- 自動車向け1000FITの電子機器: 1分で2.38個
- 10FITでも, 30分で0.7個 $\div$ 1個
- 10cmでも1桁落ち, 40cm離れれば3桁落ち=100,000FITで1個未満に
- ペースメーカーでの航空機による長距離移動は問題なしと考えると
  - 100倍の中性子量@10,000m/12H= $2.4e4/3$ 分= $2.4e5/30$ 分@重粒子線より50cm

重粒子線治療では自動運転向けのLSIで  
ようやく1個/60Gy

- ASIL-D対応のLSIはまだまだ発展途上
  - 多数決回路が必要で高コストかつ電力消費大(電池寿命が短くなる?)



# まとめ

---

- ソフトエラーは電子機器に依存した社会では考慮すべき問題
  - スーパーコンピュータ, 自動車, 医療機器ではすでに対応が進んでいる
- 地上でソフトエラーを引き起こすのは中性子と $\alpha$ 線
  - 高速中性子 ( $> 10\text{MeV}$ ) と, 熱中性子 (数 $\text{meV}$ ) がソフトエラーを起こす
  - $\alpha$ 線はパッケージ (LSIの入れ物) の放射性不純物より
- 高速中性子のソフトエラー実測は白色中性子源
  - 日本では大阪大学核物理研究センター (RCNP) で実施可能
- 医療機器の放射線影響は, ソフトエラーに加えて, 蓄積効果 (TID) も
  - 宇宙用部品を使うことでTIDによる誤動作は防げる
- 重粒子線治療の中性子線量は加速試験と同程度
  - 未対策機器だとすぐに誤動作
  - 要対策だが, 高コストかつ消費電力増大必須
  - 11月にソフトエラー試験を実施予定

