



# シミュレーションを活用した 宇宙線起因ソフトウェア研究

安部 晋一郎

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所  
原子力基礎工学研究センター 放射線挙動解析研究グループ

# はじめに

## Q1. ソフトエラーという言葉を知っていますか？

### 電子機器の一時的な誤動作

(※ 回復不可能な損傷を指すハードエラーに対し、機器自体に損傷がないため「ソフト」エラーと呼ぶ)

## Q2. ソフトエラーの頻度はどのくらいでしょう？

① 10年に1回程度 ← **何も対策していない場合**

↳ 世界中のスマートフォン(40億台稼動)のうち 1日に130万台余で  
**ソフトウェアが発生**

② 100年に1回程度 **ITRS(国際半導体技術ロードマップ)の2000年勧告**

**ISO26262(車載電子機器の機能安全規格)**

↳ **ASIL-A(ウォッシャー、バックライトなど)**

③ 1,000年に1回程度 → **ASIL-B,C(追従走行システムなど)**

④ 10,000年に1回程度 → **ASIL-D(ABS、自動運転など)**

**機器に応じて求められる信頼性は異なる。**

# 話す内容

---

- ソフトエラーの概要
- シミュレーションの概要
- 研究成果の紹介

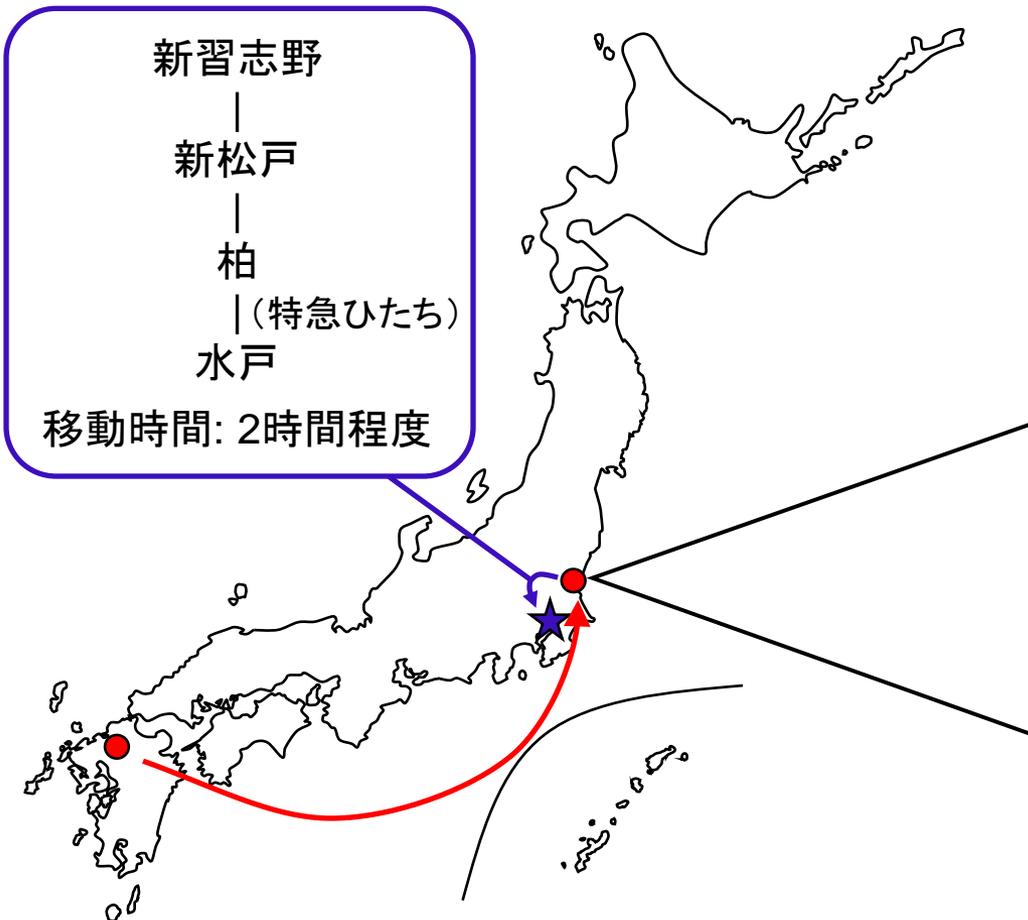
# 自己紹介

氏名: 安部 晋一郎

年齢: 38歳

出身地: 福岡県

経歴: 九州大学(福岡県) → JAEA(茨城県)



干し芋(東海村など)



借楽園(水戸)



海浜公園(ひたちなか)



海水浴場(大洗など)



笠間焼(笠間)



常陸の秋そば



笠間・岩間の栗



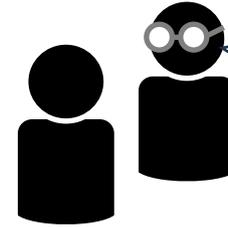
鉾田のメロン

# 自己紹介(研究経歴)

経歴	
2004年～	九州大学 工学部 エネルギー科学科
2008年～	九州大学大学院 総合理工学府 先端エネルギー理工学専攻 (修士, 博士, 学振特別研究員)
2014年～	日本原子力研究開発機構 博士研究員
2017年～	日本原子力研究開発機構 正職員(研究員)

漠然とした興味...

- エネルギー問題
- 原子力発電
- がんの放射線治療



半導体ソフトウェア研究を  
やってみない?  
放射線治療と基礎物理は  
同じだから将来役に立つよ。

## 二次宇宙線中性子起因ソフトウェアの マルチスケールシミュレーション研究

原子力機構での夏期実習  
テーマ: 計算コードPHITSの改良



ミュオンも降ってきているが  
影響は無いのだろうか

- PHITSのミュオン反応モデルの開発
- 二次宇宙線ミュオン起因ソフトウェアのシミュレーション研究

宇宙空間で起こるソフトウェアの研究

# シミュレーションを活用した宇宙線起因ソフトウェア研究

- 放射線によって電子機器に生じる一時的な誤動作

システムの再起動などで復旧できる。



スマートフォン



銀行のATM

出典) ゆうちょ銀行HP



駅の券売機や改札

出典) JR東日本HP



様々なスマート家電

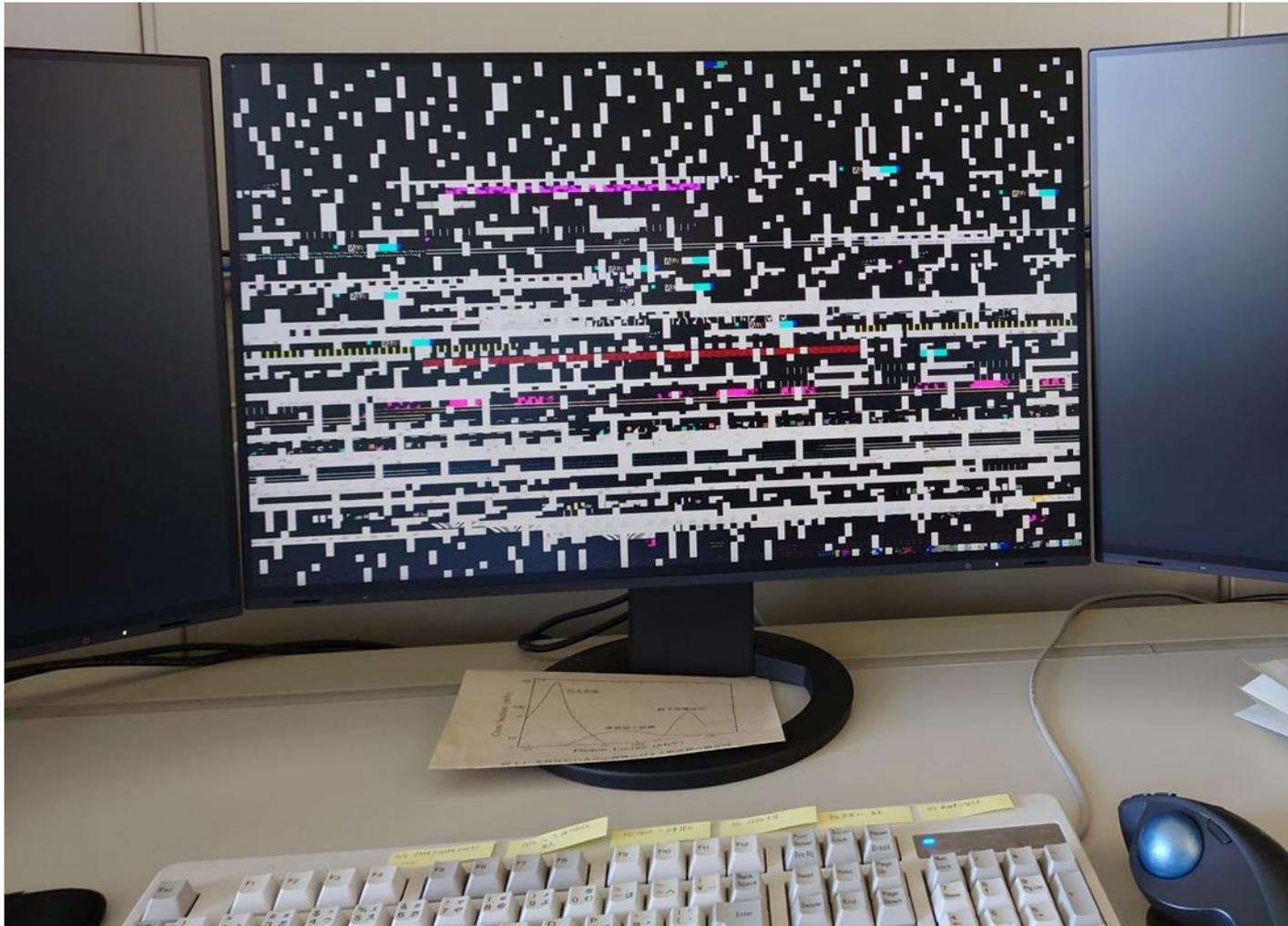
出典) 日立HP



ノートパソコン

現代の情報社会は多くの電子機器に支えられており  
ソフトウェアの影響は、より身近なものに。

# 仕事中に突然のトラブル...ソフトエラー？



再起動するとPCは正常に動作したが、作成中のppt資料はロールバック...  
作業中はこまめに保存しましょう。

# 電子機器に生じるソフトエラーの影響の実例(1)

Ref.) ComputerWorld, p. 12, Dec. 3, 2001.

## ネットワーク機器のシステム障害(2000年前後)

電気通信会社、ウェブ企業、銀行などで、サン・マイクロシステムズ社のハイエンドサーバー(1台5~100万ドル)が頻繁にクラッシュ

CPUに搭載されたIBM社のSRAMがソフトエラーに脆弱だったことが原因  
(メモリ素子の1種、詳細は後述)

IBM社のSRAMは  
二度と購入しない!



サン・マイクロシステムズ社 CEO  
Scott McNealy氏  
(ComputerWorld 2001)

- ✓ 補償、原因調査などに要する費用や労力
- ✓ 会社の信頼問題
- ✓ 通信・金融システムの停止による経済損失 ... 場合によっては人命に係わる事故にも...

# 電子機器に生じるソフトウェアの影響の実例(2)

Ref.) Australian Transport Safety Bureau, "ATSB TRANSPORT SAFETY REPORT," AO-2008-070, 2008.

## 飛行機の制御システムの不具合(2008年10月)

カンタス航空72便がシンガポールからオーストラリアに向けて  
高度37,000ft(11km)を航行中、慣性基準装置が誤データを発信

フライト制御コンピュータが下降を命令したことで、72便は2度急降下

乗員・乗客が天井に頭部を強打するなどして12人が重傷, 107人が軽傷



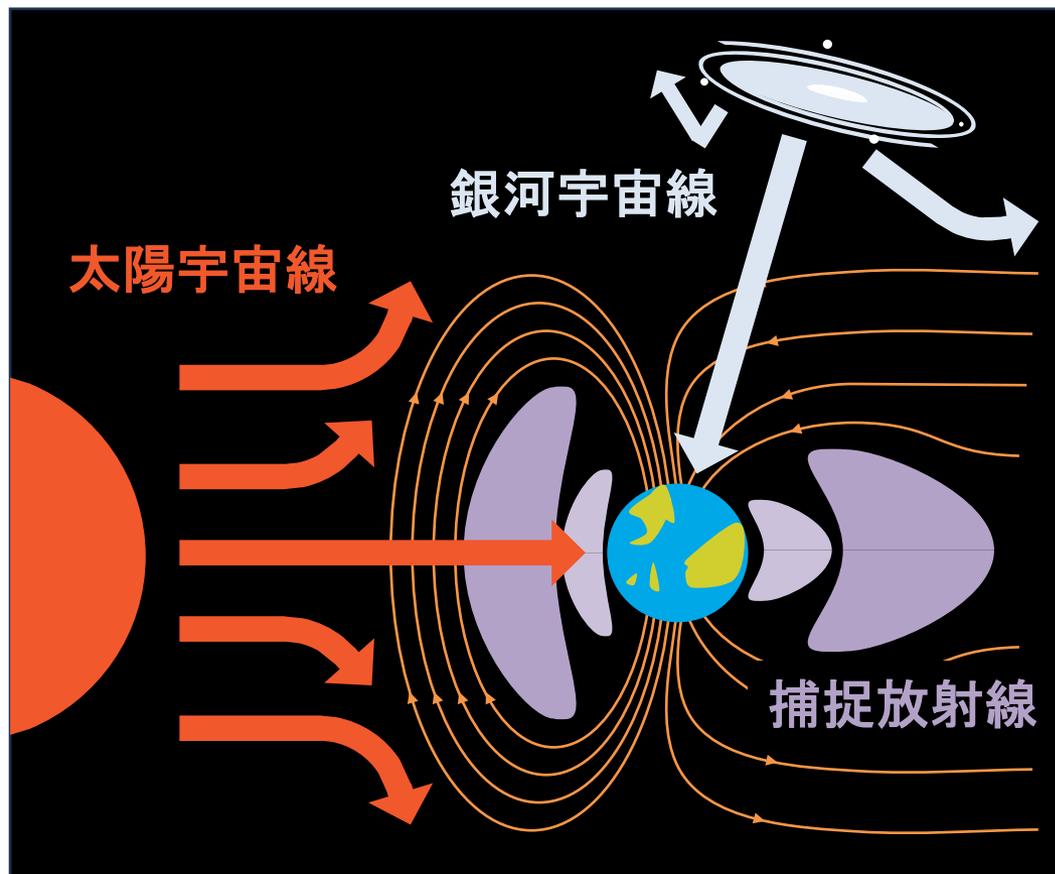
事故原因の評価の結果、  
**ソフトウェアのみが**  
**not unusual(ありうるが証拠不十分)**  
その他の要因はunlikely(ありえない),  
very unlikely(非常にあり得ない)

**長期間の安定動作が必要な機器、人命に係る機器は信頼性が大事**

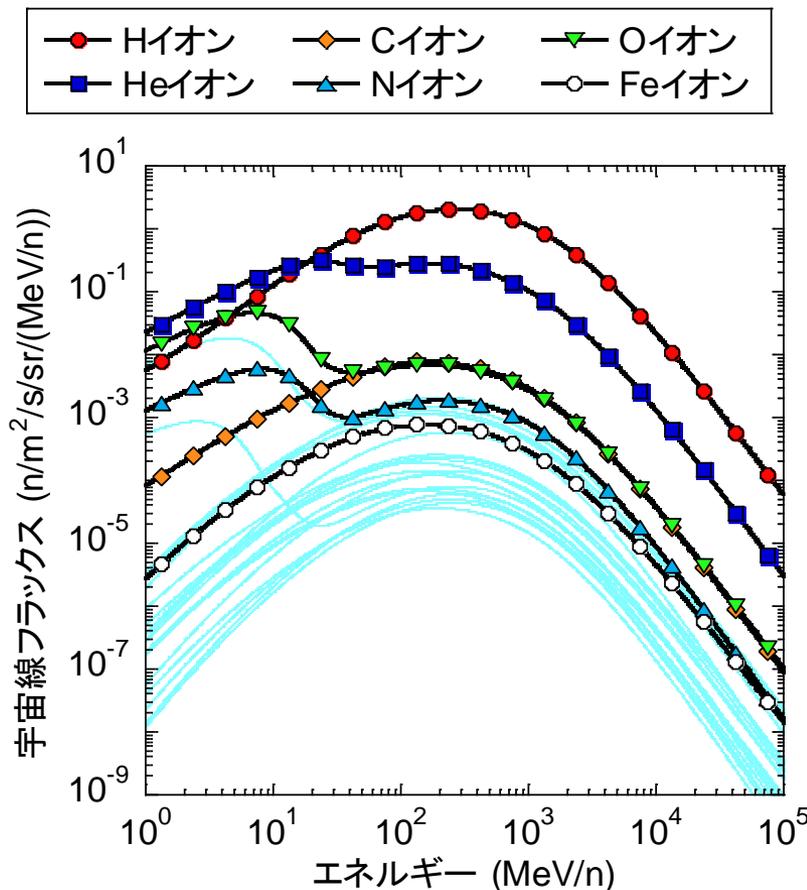
# シミュレーションを活用した宇宙線起因ソフトウェア研究

## ● 宇宙空間を飛び交う様々な放射線

粒子線(陽子, 中性子, 電子, etc.)と電磁波の総称



宇宙での放射線環境の模式図



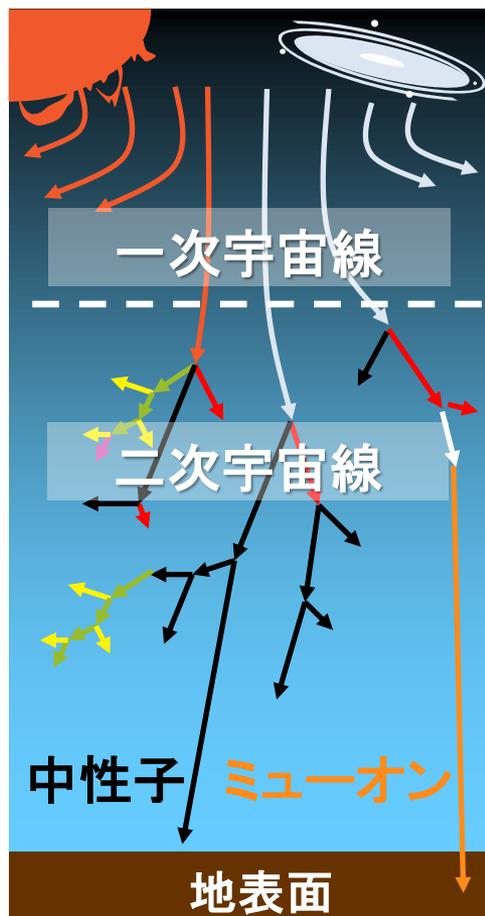
静止軌道上の宇宙線フラックス

出典) CREME96: <https://creme.isde.vanderbilt.edu/>

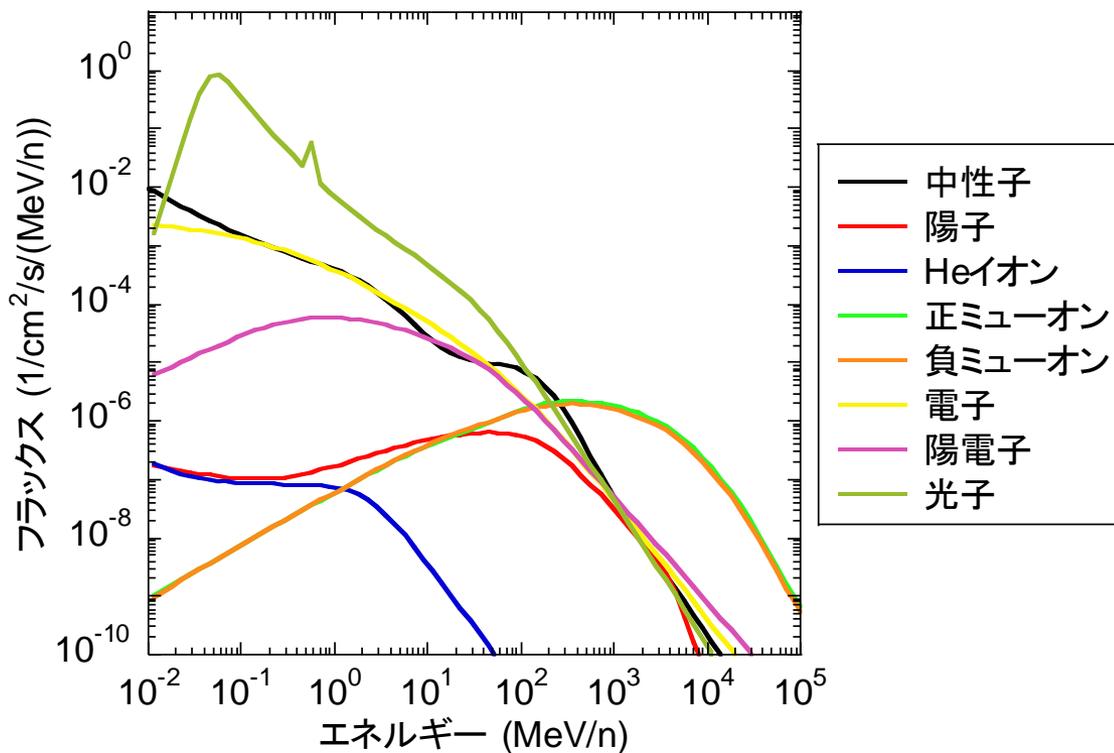
(※ MeV: メガ電子ボルト, エネルギーの単位,  $1 \text{ MeV} = 1.602\text{e-}13 \text{ J}$ ,  $1 \text{ MeV}/n$ の運動エネルギーのイオンの速度は光速の4.6%程度)

# 地上に降り注ぐ宇宙線

二次宇宙線 ... 一次宇宙線と大気との核反応で生じる放射線



二次宇宙線発生の様式図



2024/1/1の千葉工大での二次宇宙線フラックス

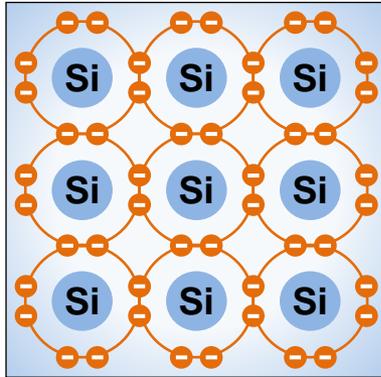
出典) EXPACS: <https://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>

放射線が半導体素子に入射するとソフトエラーが起こることがある。

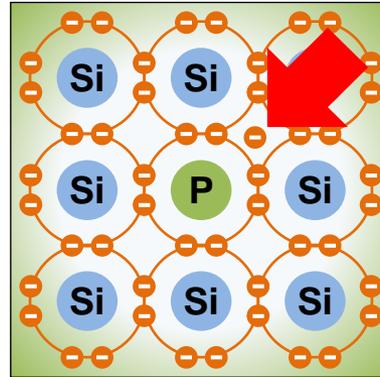
# 半導体と素子

ある電圧までは電流が流れず、それ以上で電流が流れる物質

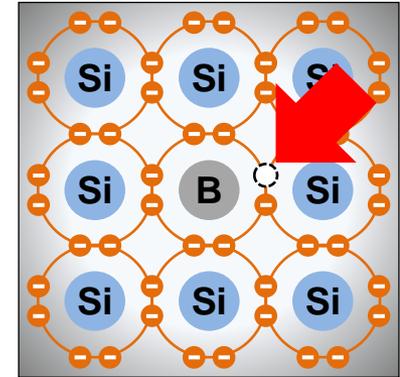
シリコン(Si), ゲルマニウム(Ge), ガリウムヒ素(GaAs), カドミウムテルライド(CdTe), 炭化ケイ素(SiC) ...



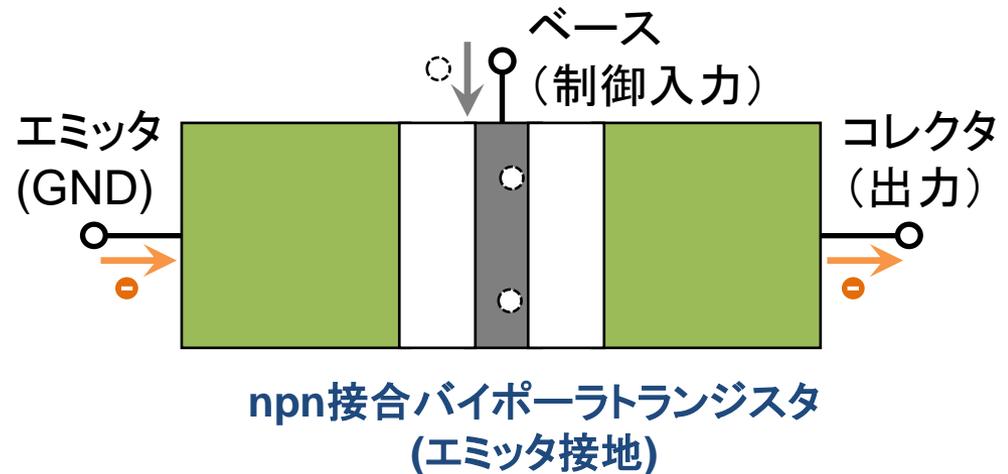
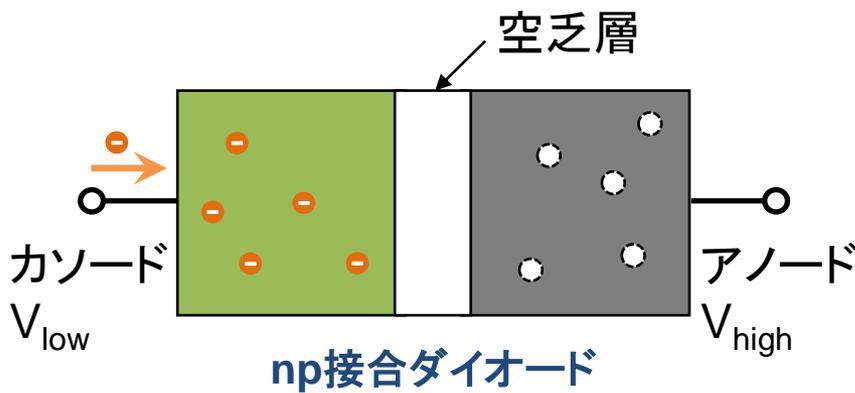
真性半導体



n型半導体

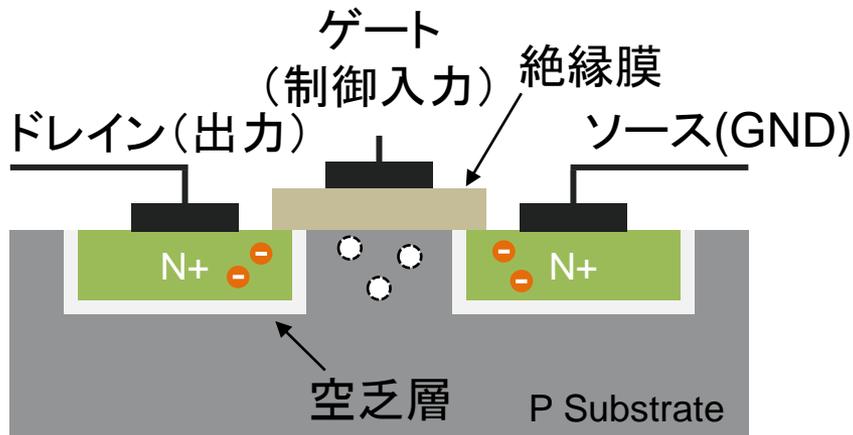


p型半導体

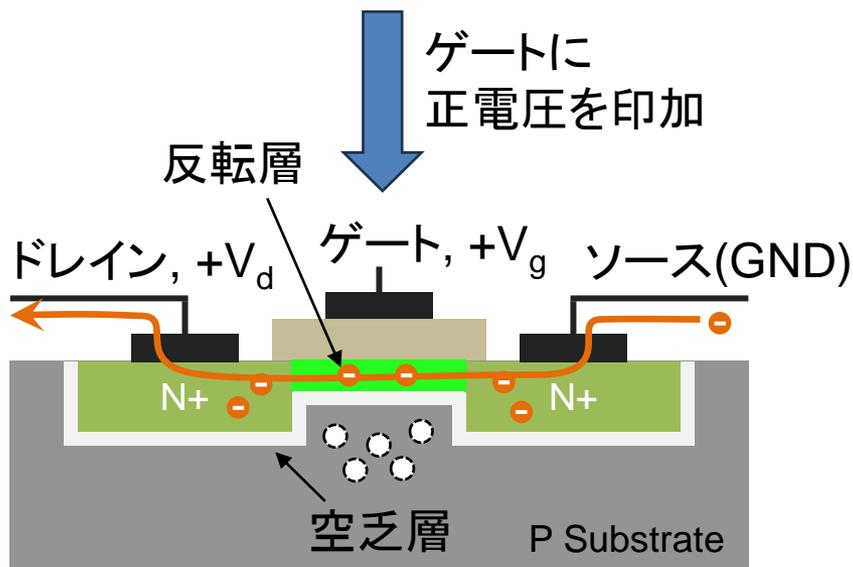


# MOSFETとフリップフロップ回路

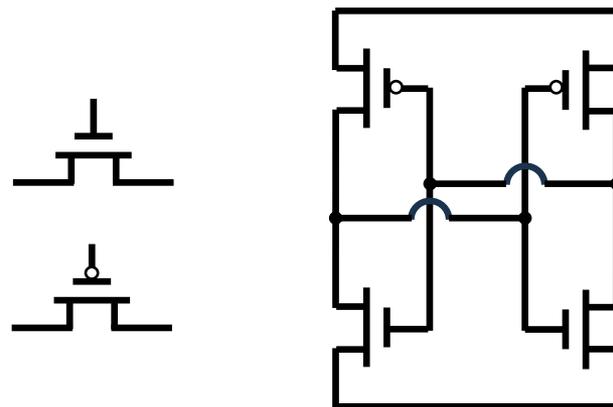
Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor  
 (金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)



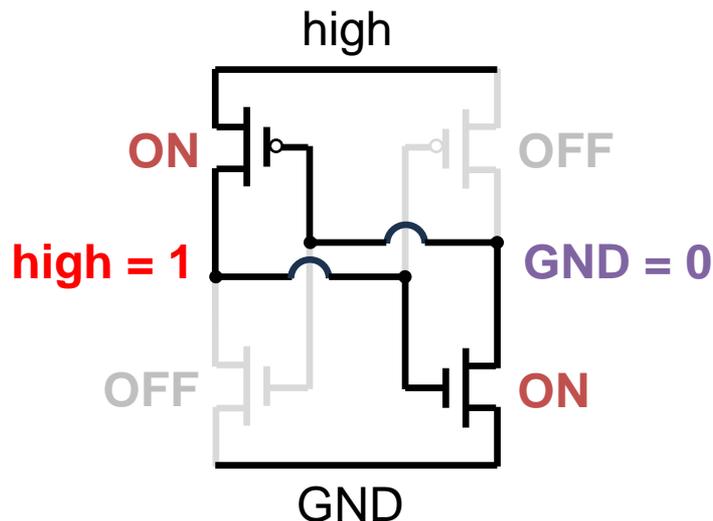
NMOSFET (非導通状態)



nMOSFET (チャネル導通状態)



NMOSFET(左上), PMOSFET(左下)の回路記号  
 および4T-フリップフロップ(右)の回路図

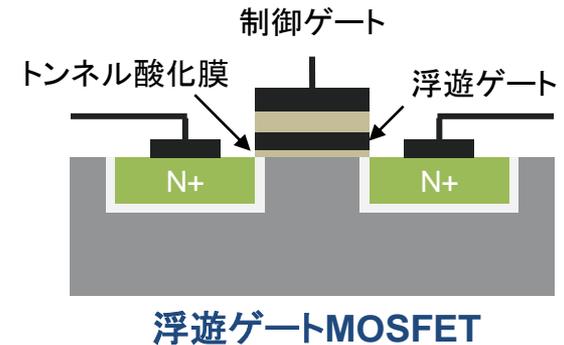


4T-フリップフロップの論理値の保持状態

# 半導体メモリの種類

## ◆ 不揮発性メモリ: 電源を供給しなくても情報を保持できるメモリ

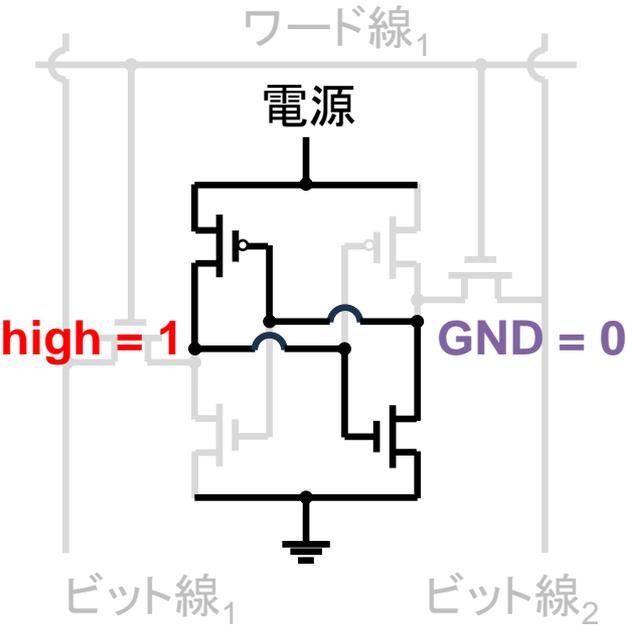
- **マスク ROM (Read Only Memory):** ガラス乾板(フォトマスク)で情報を固定  
(用途: ゲーム機のROMカートリッジ, 電子辞書データ, プリンタのフォントROM ...)
- **フラッシュメモリ:** 浮遊ゲートMOSFETの浮遊ゲートに電子を蓄えることで情報を記録  
(用途: USBメモリ, SDカード, SSD ...)
- **強誘電体や磁気抵抗などを利用したメモリも...**



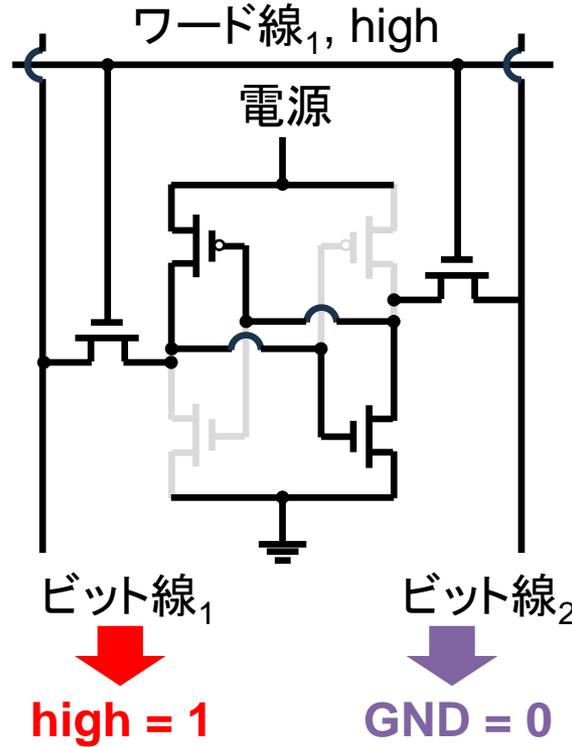
## ◆ 揮発性メモリ: 電源を供給しないと情報が保持できないメモリ

- **DRAM (Dynamic Random Access Memory):**  
コンデンサに電荷を蓄えて情報を記録。一定時間ごとにリフレッシュ動作が必要。  
(用途: PCやスマートフォンなどのメインメモリ, ...)
- **SRAM (Static Random Access Memory):**  
フリップフロップ回路に情報を記録。リフレッシュ動作が不要。  
(用途: CPUなどのキャッシュメモリ, ...)

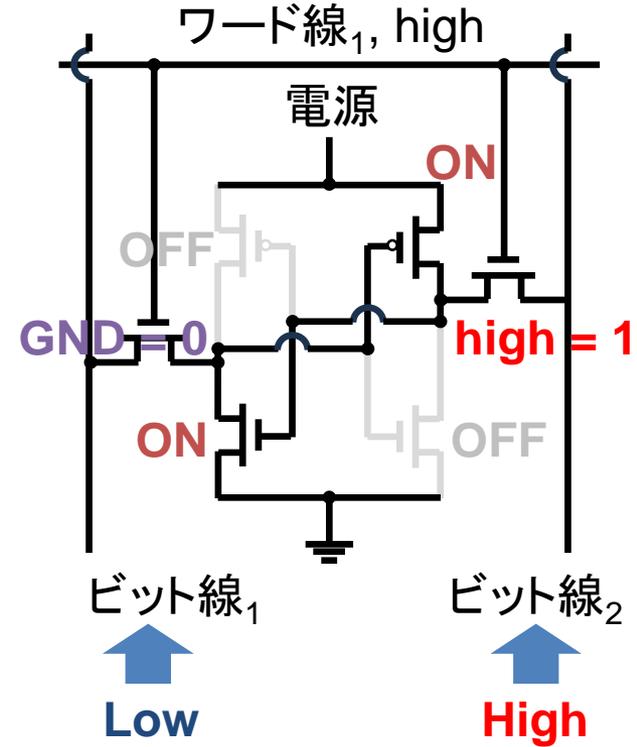
# SRAMの動作原理



6T-SRAMの回路図

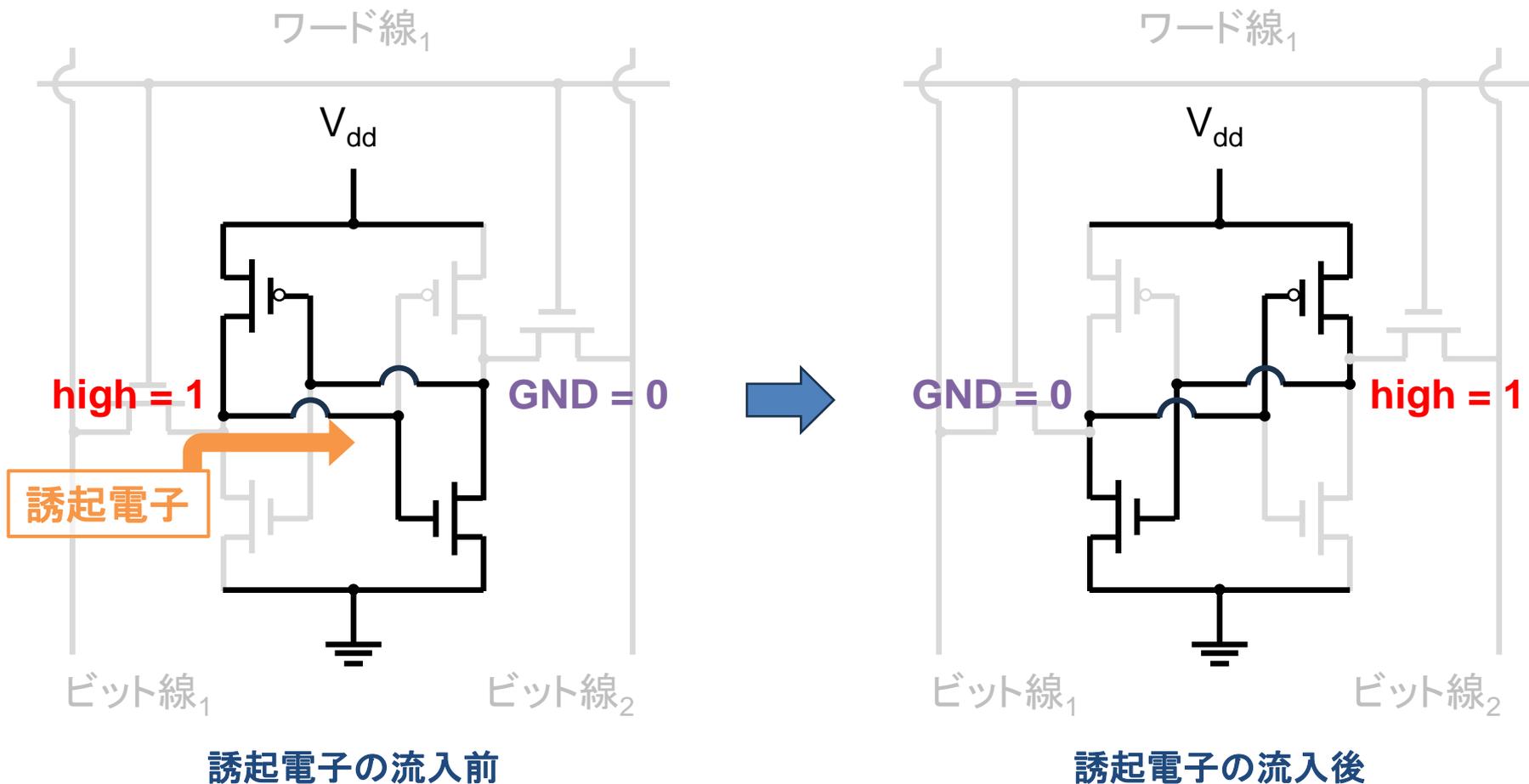


6T-SRAMの読み取り



6T-SRAMの書き込み

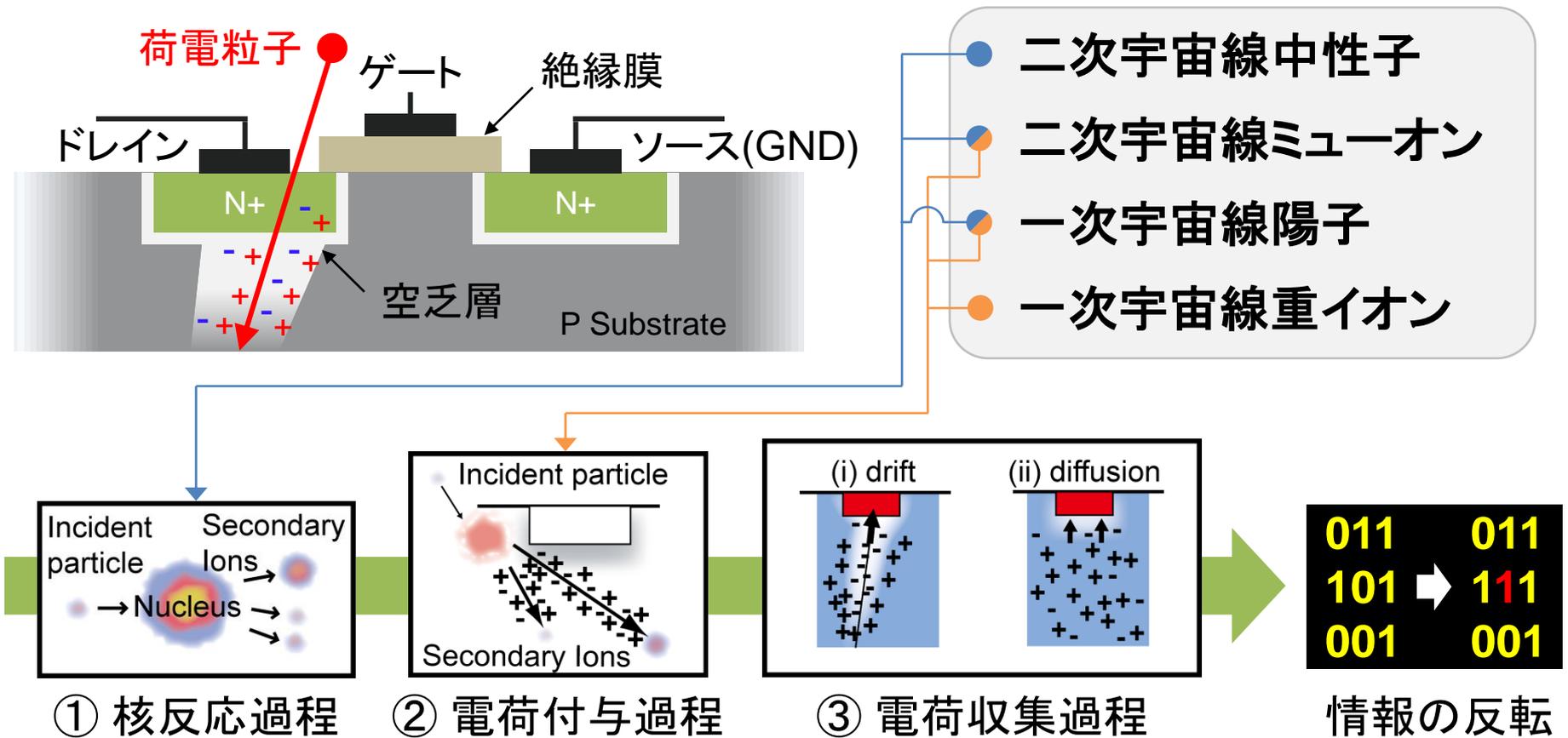
# SRAMの保持情報の反転の原理



OFF状態のNMOSFETのドレイン電極に十分な電子が流れ込むと、ON状態のNMOSFET および OFF状態のPMOSFETが切り替わり、SRAMの保持情報が**反転**する。

シングルイベントアップセット (SEU: Single Event Upset)

# 放射線が引き起こすSRAMのSEU



荷電粒子によりデバイス内に付与された電荷のうち、一部の電子がOFF状態のNMOSFETのドレイン電極に収集されるとSEUが生じる。

# 参考: 半導体デバイスに対する放射線影響

## ■ 半導体の放射線影響の分類

ソフトウェア  
ハードエラー

### → ◆ シングルイベント効果 (SEE: Single Event Effect)

- **SEU (Single Event Upset):** メモリ素子の情報が反転
- **SET (Single Event Transient):** ロジック回路に誤信号パルスが伝搬
- **SEL (Single Event Latch-up):** 寄生サイリスタがONになり大電流が発生
- **SEB (Single Event Burnout):** 大電流が局所的に流れて素子が破壊
- **SEGR (Single Event Gate Rupture):** ゲート電極下の絶縁膜が破壊

### → ◆ 累積効果

- **トータルドーズ効果 (TID: Total Ionizing Dose effect):**  
半導体内に生成された電荷が徐々に溜まり、素子の諸特性が劣化する。
- **はじき出し損傷効果 (DD: Displacement Damage Dose effect):**  
半導体の結晶を構成する原子がはじき出され、素子の諸特性が劣化する。

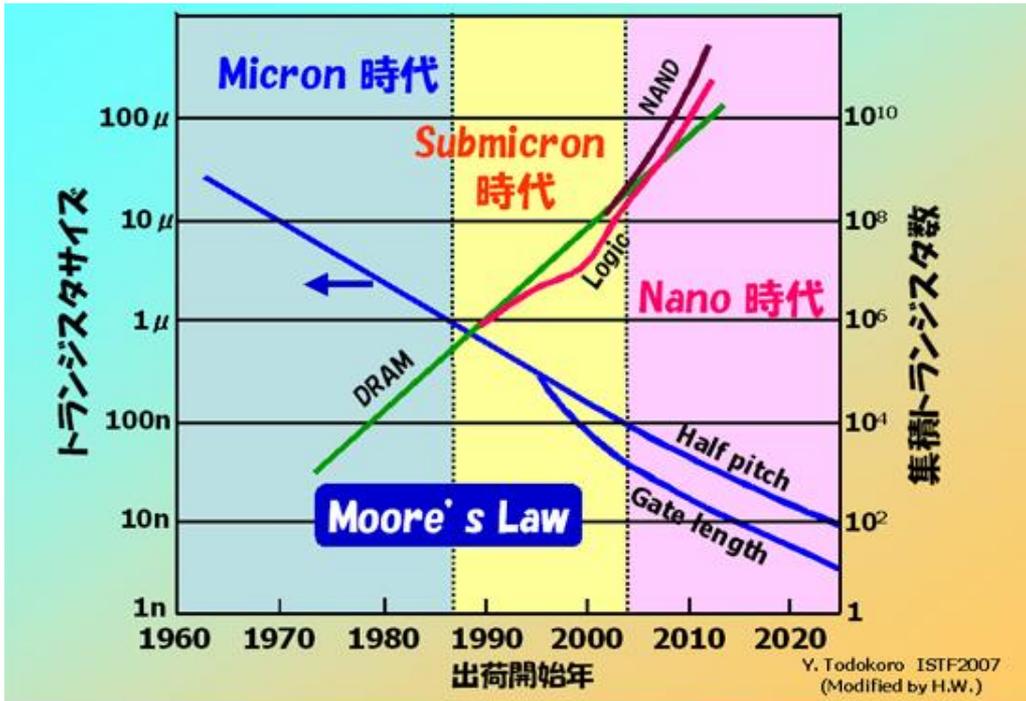
# ソフトウェア研究の歴史

年代	内容
1975年	<ul style="list-style-type: none"><li>宇宙空間で<b>高エネルギーの一次宇宙線</b>がソフトウェアを起こすことが報告される。</li></ul>
1978年	<ul style="list-style-type: none"><li>Intelによってソフトウェアの発生メカニズムが明らかになる。</li><li>材料中の<b>微量の放射性不純物から放出されるアルファ粒子</b>によって地上でもソフトウェアが起こることが報告される。</li></ul>
1979年	<ul style="list-style-type: none"><li><b>中性子</b>も核反応を介してソフトウェアを起こすことが報告される。</li></ul>
1980年代～ 1990年代前半	<ul style="list-style-type: none"><li>材料中の放射性不純物の除去など、アルファ粒子起因のソフトウェアに関して研究・対策が進む。</li></ul>
1990年代後半	<ul style="list-style-type: none"><li>複数の研究グループが中性子起因ソフトウェアの危険性を指摘</li></ul>
1998年	<ul style="list-style-type: none"><li>NASAが耐放射線回路を発表</li></ul>
2000年	<ul style="list-style-type: none"><li>Intelが耐放射線回路を発表</li><li>材料中の<sup>10</sup>Bが<b>熱中性子を捕獲して放出されるアルファ粒子</b>がソフトウェアを起こすことが報告される。</li></ul>
2001年	<ul style="list-style-type: none"><li>JEDECが<b>中性子ソフトウェア標準試験法</b>を策定 (JESD89)</li></ul>
2002年	<ul style="list-style-type: none"><li>半導体デバイスの<b>微細化に伴いソフトウェアの発生件数が増加</b>すると報告され、この問題の重要性が広く認知される。</li></ul>
2005年	<ul style="list-style-type: none"><li>JEITAが<b>ソフトウェア試験ガイドライン</b>を策定 (EDR-75)</li></ul>

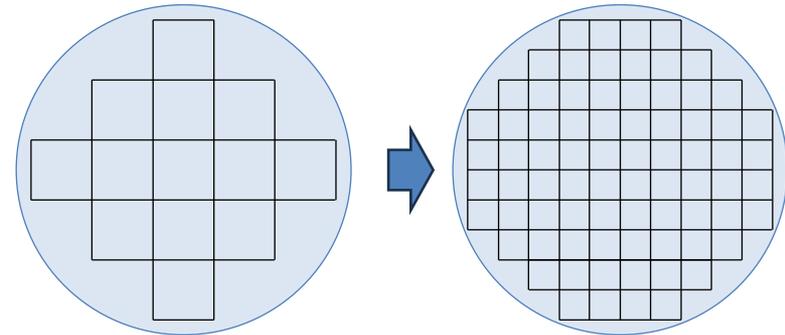
# 半導体デバイスの微細化

半導体デバイスの1辺のサイズが  $1/k$  だけ小さくなると ...

- ✓ 同じ面積に搭載できるトランジスタ数は  $k^2$  倍 増える。
- ✓ 信号が伝わる距離が短くなり、動作速度は  $k$  倍 速くなる。
- ✓ 動作に必要な電力量は  $1/k$  だけ減少する。



電子機器が  
高速、高機能、省電力、  
小型、大容量、低価格に



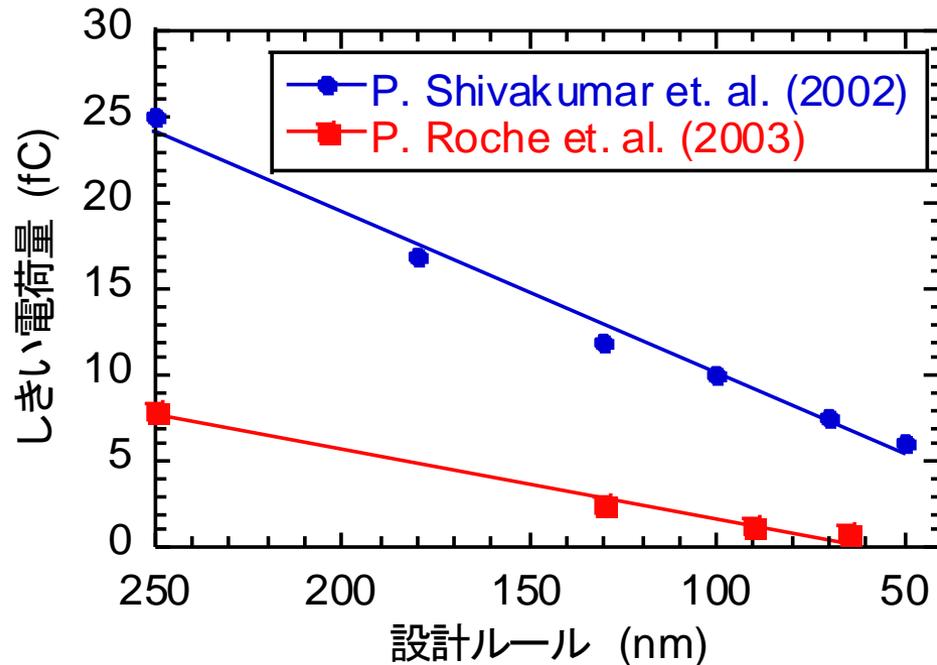
トランジスタサイズ(設計ルール)と集積トランジスタ数の変化

出典) JEITA ホームページ

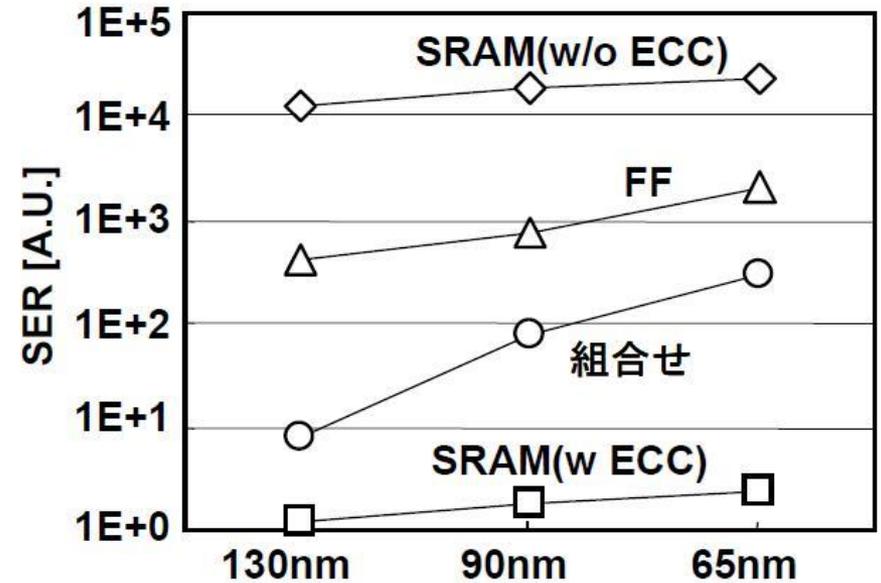
シリコンウエハから切り出せる  
トランジスタ数

# 半導体の微細化とソフトエラー耐性の低下

- ✓ 微細化に伴う省電力化により、SEUが起きるために必要な収集電荷量(しきい電荷量)が低下
- ✓ 1つのデバイスに搭載する素子が増えることで、エラー件数も増加



設計ルールとしきい電荷量の相関



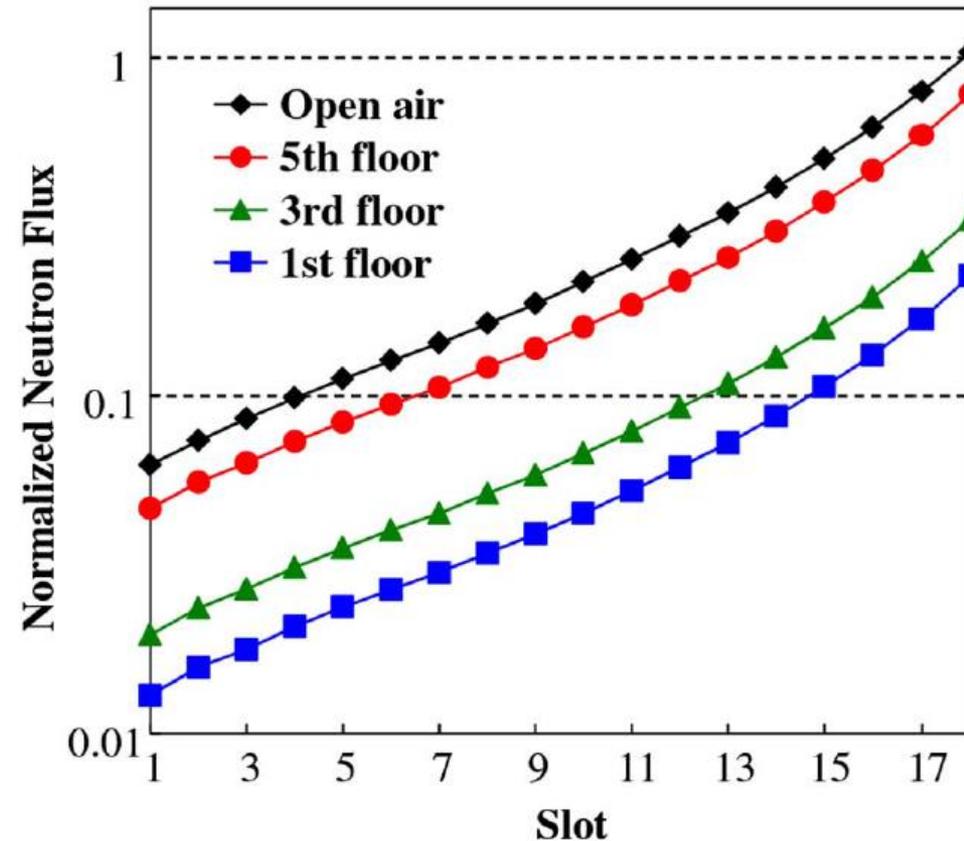
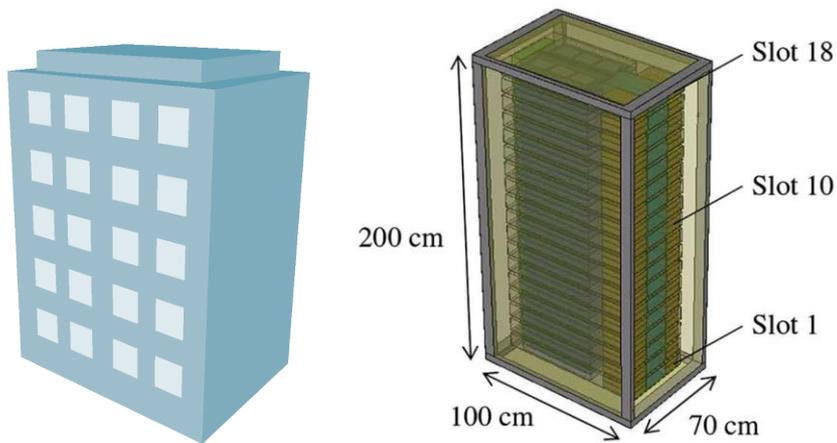
ソフトエラーのトレンド(1CPU相当)

出典) T.Uemura et al., 秋季応用物理学会 (2007).

# ソフトウェアの対策法(1)

入ってくる放射線量を減らす(設置場所の検討、遮蔽など)

- 放射線取扱施設における遮蔽
- 建物による遮蔽
- サーバー筐体などによる遮蔽



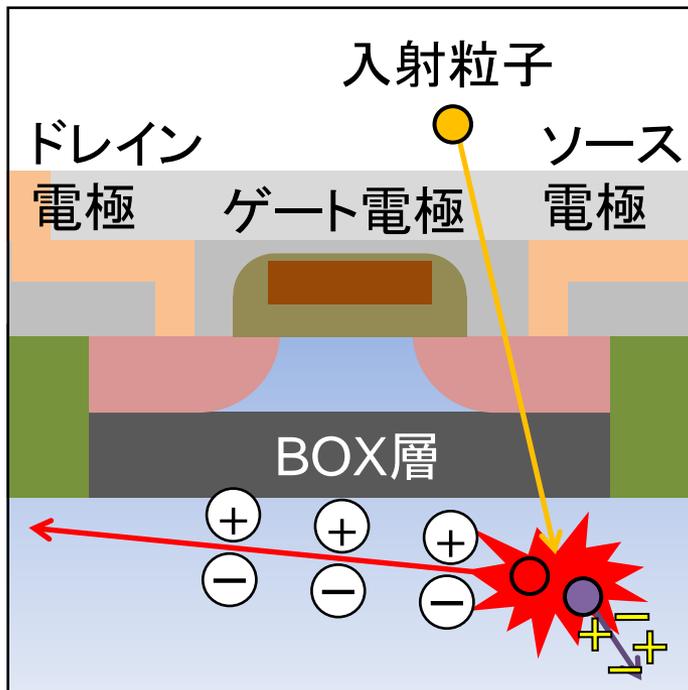
Ref.) T. Kato et al., IEEE TNS vol.61, p.3408 (2014).

# ソフトウェアの対策法(2)

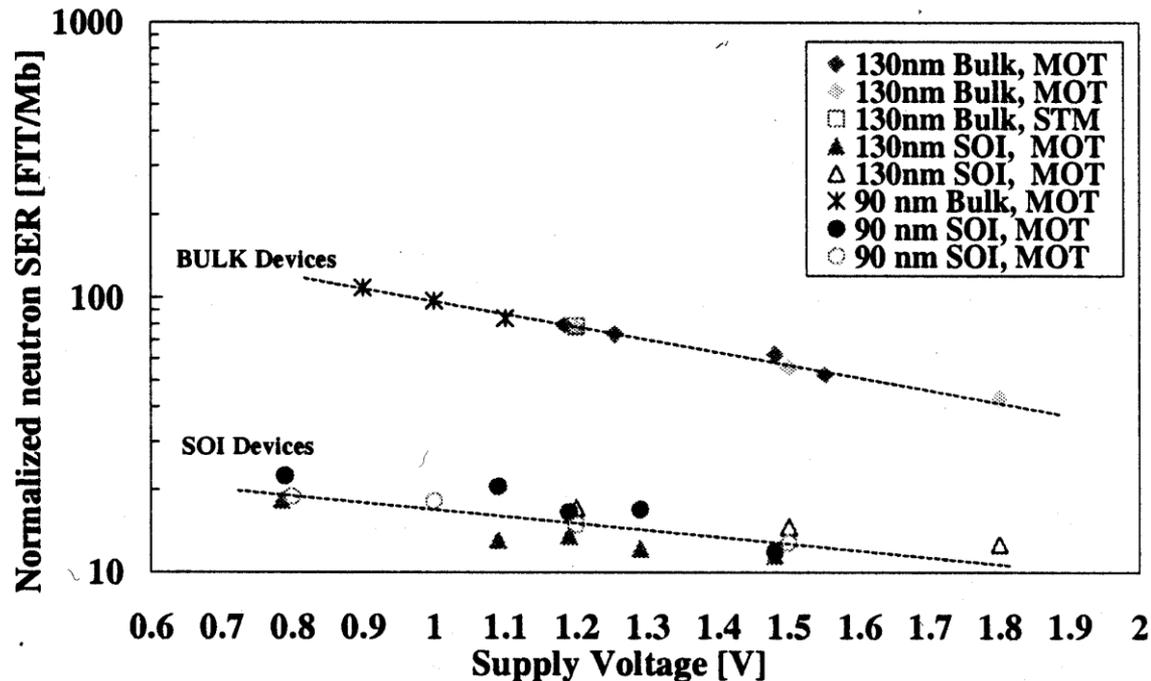
## 半導体デバイスの構造に工夫を加える

### 例) SOI (Silicon On Insulator) デバイス

埋め込み酸化膜 (BOX: Buried Oxide) でトランジスタと基板を分離し、ノイズ電荷の流入を低減する



SOIデバイスの模式図



Ref.) P. Roche et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., 50, 2046-2054 (2003).

# ソフトウェアの対策法(3)

## システムに冗長性を持たせる

### 例) Error Check Code (ECC)

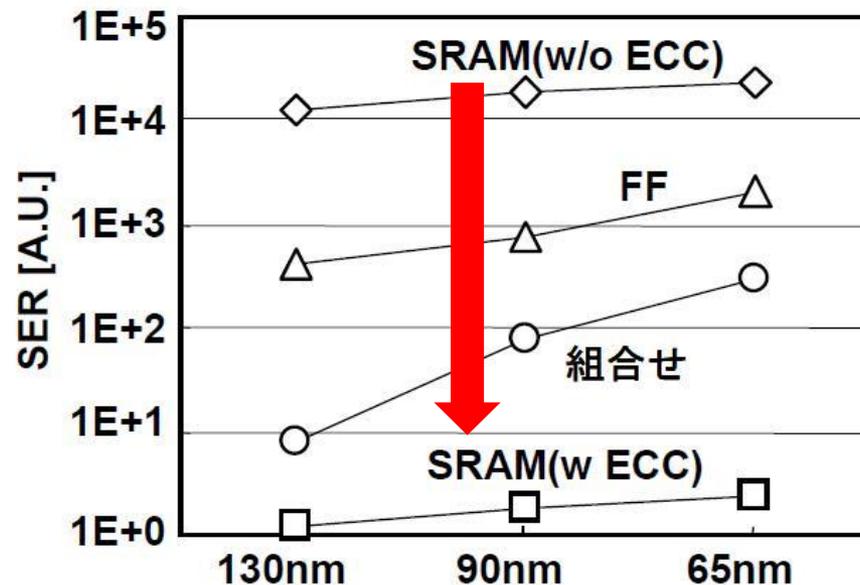
8bitの通常データに1bitのパリティデータを付与し、9bitのデータの合計が偶数(or奇数)になるようパリティデータの値を設定

➡ データを読み込む際に偶/奇をチェックしてエラーを検出・訂正

1	0	1	1	0	1	0	0	
0	1	0	1	0	1	0	1	
1	1	0	0	1	1	0	0	奇数
0	0	1	1	0	0	1	1	
1	1	0	1	1	0	1	0	
0	1	1	0	0	0	1	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	1
1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1	

奇数

奇数



再掲載: ソフトエラーのトレンド(1CPU相当)

出典) T.Uemura et al., 秋季応用物理学会 (2007).

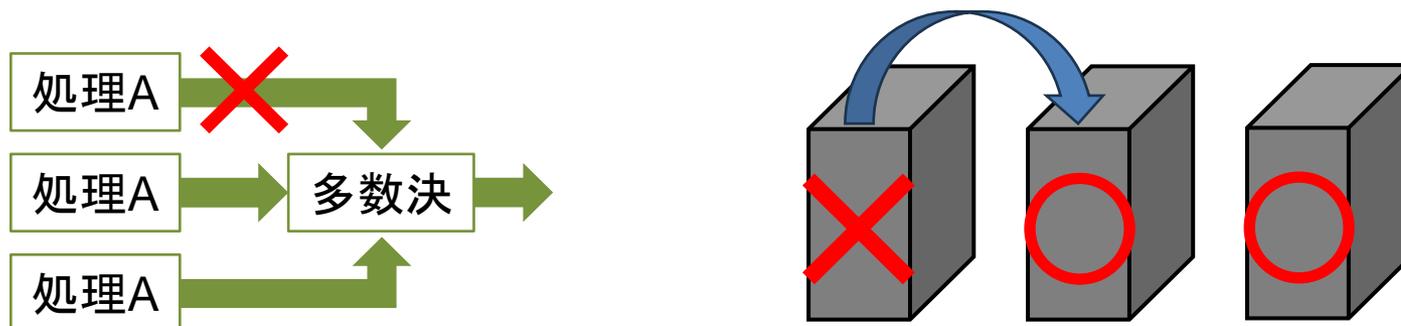
# ソフトウェアの対策法(4)

## システムに冗長性を持たせる

### 例) 回路・システムの多重化

回路・システムの複製を用意し、

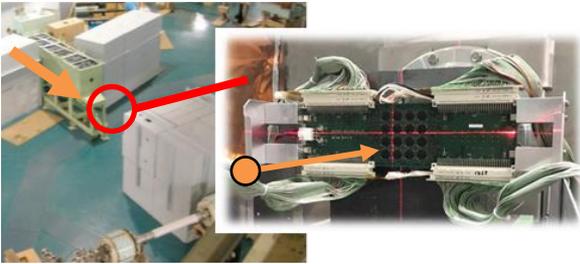
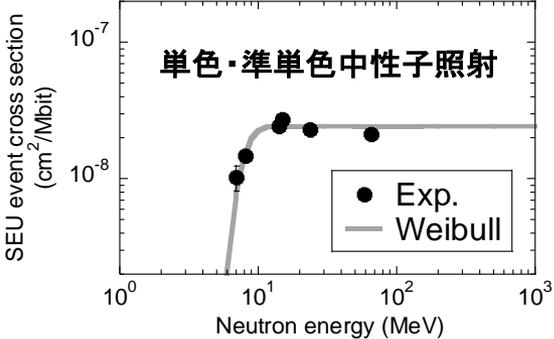
同じ処理を実行させて多数決を取る。  
障害が発生したら予備に切り替える。



電子機器の全ての部品に対策を施すことは高コスト ...  
各部品が要求される信頼性を満たしていれば良い。

**ソフトウェア発生率 (SER: Soft Error Rate) の評価が必要**

# 地上環境SER ( $SER_{GND}$ ) の評価手法

	フィールド試験	加速試験	
			
😊	正確な $SER_{GND}$ が得られる	フィールド試験よりも短時間で実測値が得られる	
😞	大量のデバイスを長期間運用 (高コスト)	$SER_{GND}$ を得るには測定値の補正が必要 照射施設が国内で1か所、全世界でも数か所 少なくとも4点以上の測定値が必要	

- ❑ 技術の進歩が早く、実物が完成する前に評価が必要
- ❑ 評価が求められる半導体デバイス全てを試験することは難しい

**シミュレーションによる $SER_{GND}$ 評価の重要性が高まっている。**

# 話す内容

---

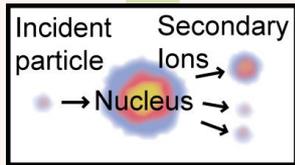
- ソフトエラーの概要
- シミュレーションの概要
- 研究成果の紹介

# ソフトウェア発生までの各過程のシミュレーション方法

## ① 環境放射線情報



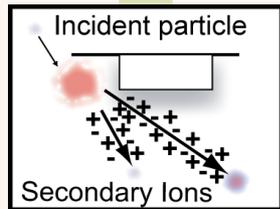
- ✓ 実測値に基づく経験式 (M. S. Gordon, etc.)
- ✓ 宇宙線スペクトル計算モデル (PARMA, etc.)



## ① 核反応過程

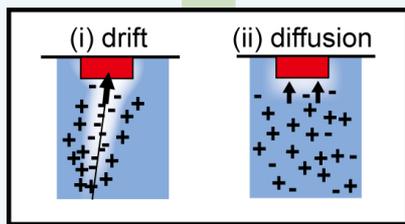


- ✓ **放射線挙動解析コード**  
(PHITS, MCNP6, Geant4, etc.)

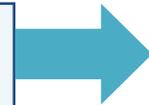


## ② 電荷付与過程

- ✓ 阻止能計算モデル (SRIM & TRIM, etc.)  
※ イオン入射の場合のみ



## ③ 電荷収集過程



- ✓ **デバイスシミュレータ**  
(HyENEXSS, Sentaurus, ATLAS, etc.)
- ✓ **有感領域モデル** (SSVモデル, MSVモデル)

## ④ 回路・システム応答



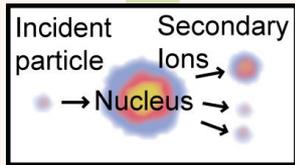
- ✓ しきい電荷量(臨界電荷量)による判定
- ✓ 電子回路シミュレータ (SPICE, etc.)

# ソフトウェア発生までの各過程のシミュレーション方法

## ① 環境放射線情報



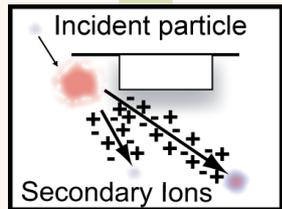
- ✓ 実測値に基づく経験式 (M. S. Gordon, etc.)
- ✓ 宇宙線スペクトル計算モデル (PARMA, etc.)



## ① 核反応過程

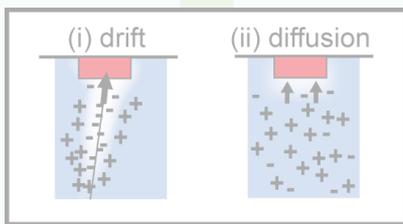


- ✓ **放射線挙動解析コード**  
(PHITS, MCNP6, Geant4, etc.)



## ② 電荷付与過程

- ✓ 阻止能計算モデル (SRIM & TRIM, etc.)  
※ イオン入射の場合のみ



## ③ 電荷収集過程



- ✓ **デバイスシミュレータ**  
(HyENEXSS, Sentaurus, ATLAS, etc.)
- ✓ **有感領域モデル** (SSVモデル, MSVモデル)

## ④ 回路・システム応答



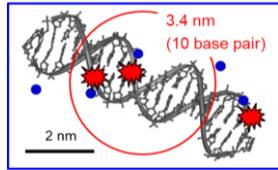
- ✓ しきい電荷量 (臨界電荷量) による判定
- ✓ 電子回路シミュレータ (SPICE, etc.)

# 放射線挙動解析コード PHITS

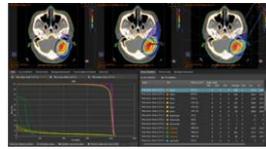
Particle and Heavy Ion Transport code System

## 基本特性

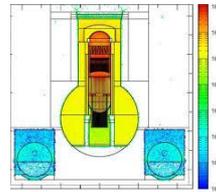
任意体系中における、幅広いエネルギーの様々な放射線の挙動を核反応モデルや核データライブラリを用いて模擬するモンテカルロ計算コード



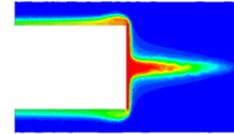
DNAダメージ



医療応用



ADS・廃炉設計



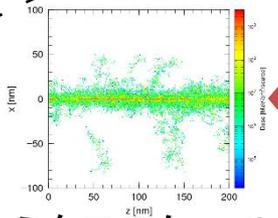
熱核連携



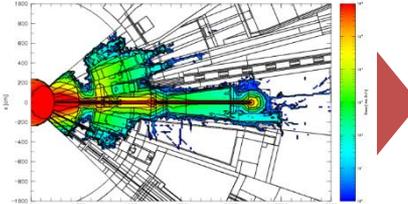
宇宙探査



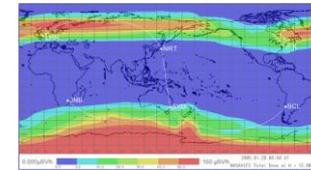
半導体エラー



ミクروسケール



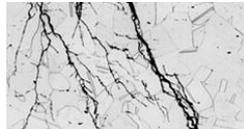
標準スケール



マクروسケール



太陽・天体物理



材料損傷・物性変化



発光メカニズム

**PHITS**

放射線挙動解析コード

利用申請書をPHITSホームページより提出することで、全ての構成要素 (ソースコード、実行ファイル、データライブラリ、画像出力ツールなど) が集約されたパッケージを 無償 で入手可能

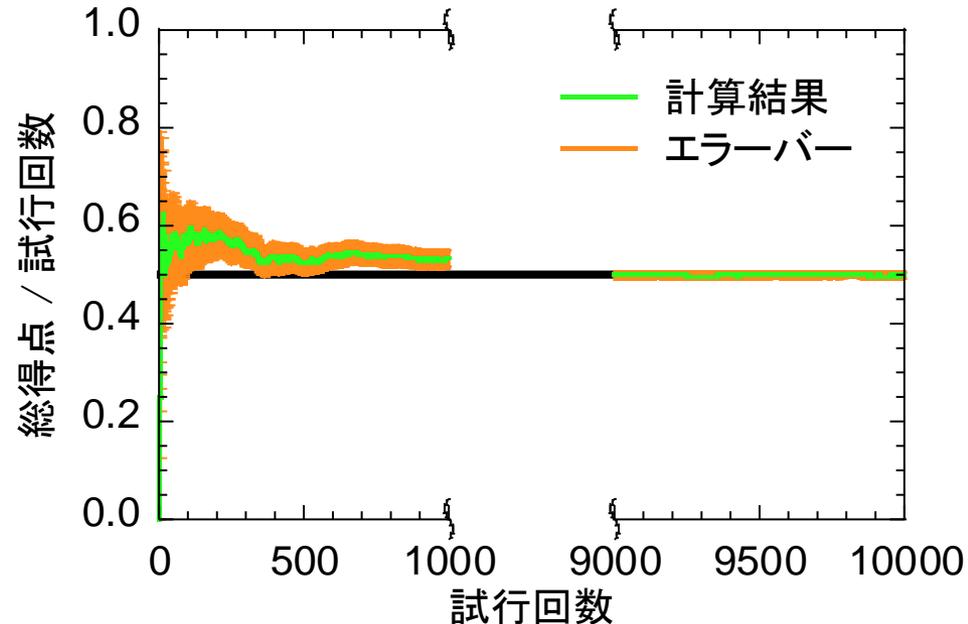
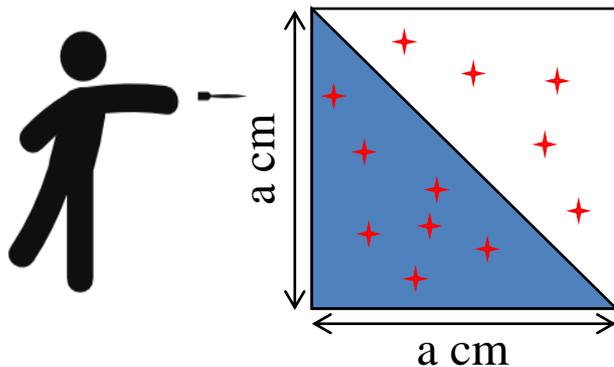
# モンテカルロ計算とは

ある確率で生じる事象を  
一様乱数を使って模擬する  
コンピュータシミュレーション手法

カジノで有名なモナコ公国の地区名  
(F1やWRCでも有名)

## (例) モンテカルロ積分による面積の概算

1辺  $a$  cmの正方形の内部にランダムに  
点を打ち、色の付いた部分なら+1点

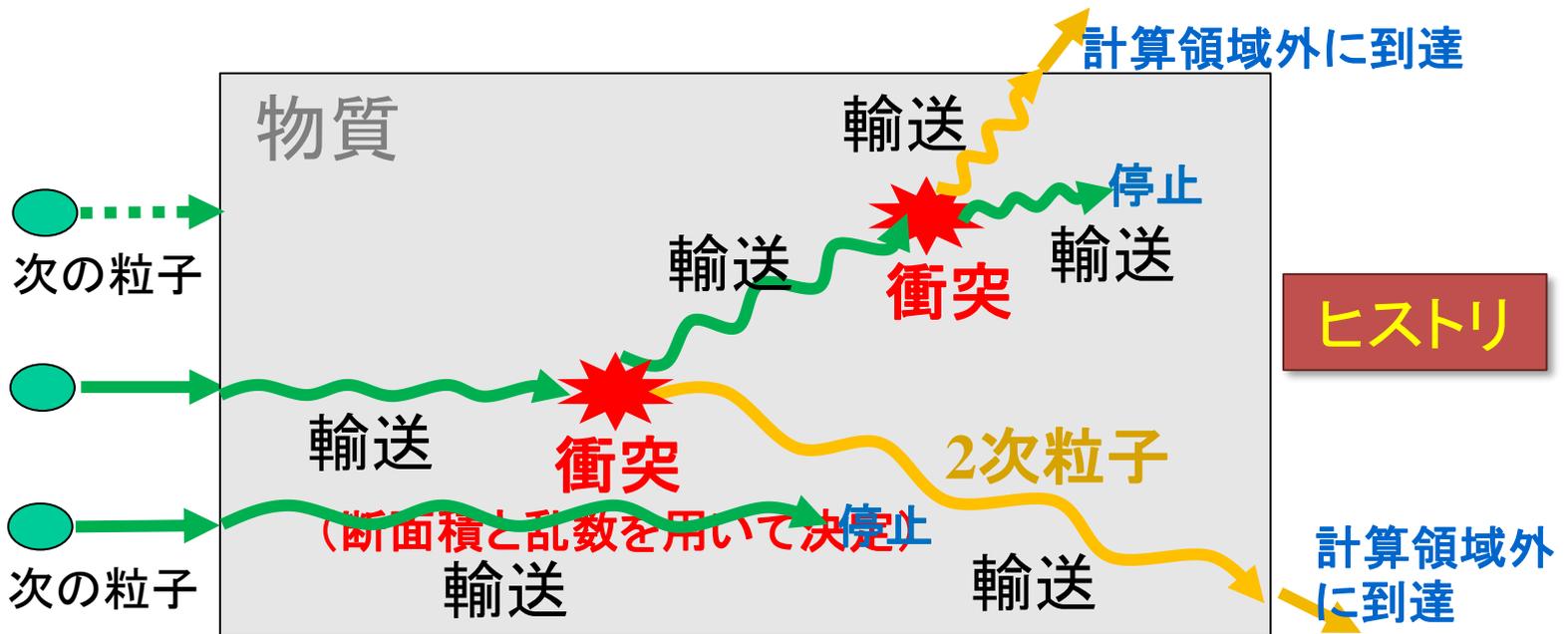


試行回数を増やすと、総得点 / 試行回数の値は、全体に対する色の付いた部分の比に近づいていく(上の例では $1/2$ )。これに的的面积( $a^2$ )を乗じると、色の付いた部分の面积( $a^2/2$ )を概算することができる。

# モンテカルロ計算による放射線挙動解析

1つ1つの放射線の挙動を、乱数を用いて確率的に再現し、その平均的な振る舞いを推定する。

→放射線が量子力学に従って確率的に動くため成立

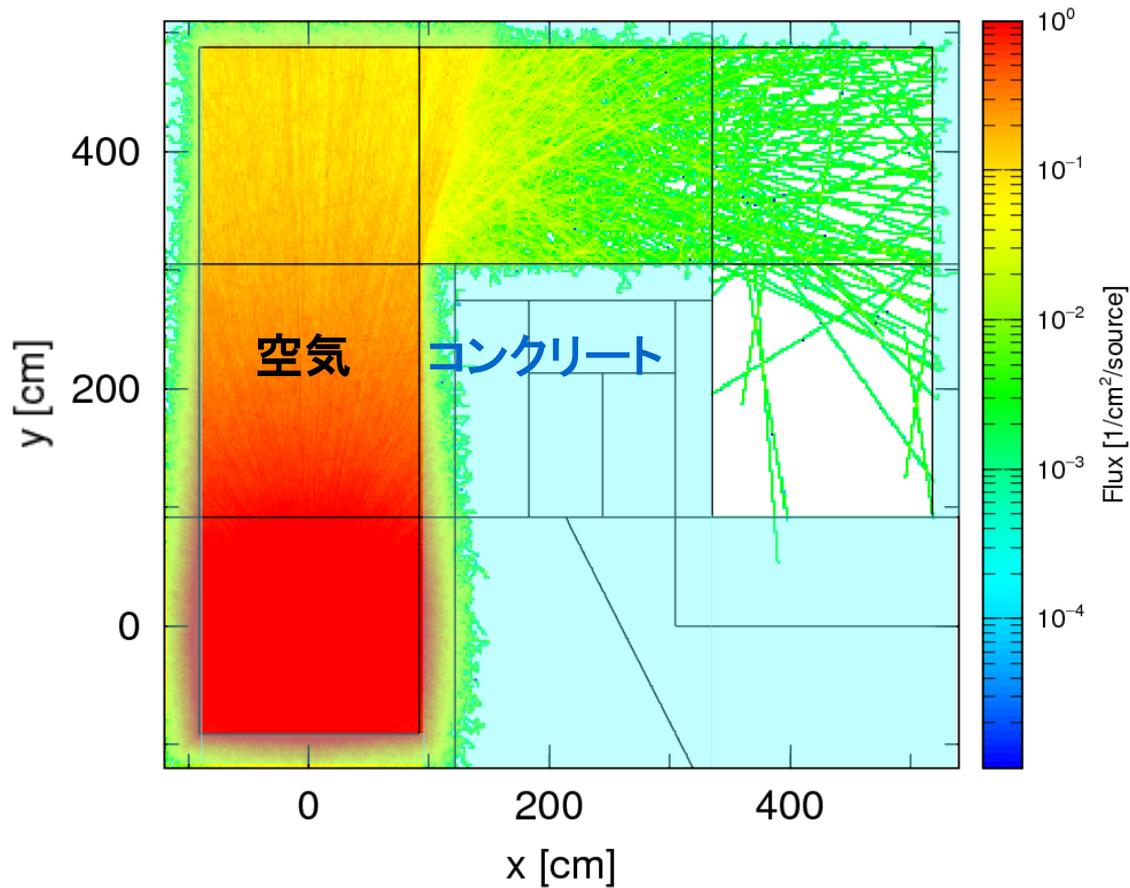


- ✓ ヒストリーを繰り返すことで、放射線の平均的な挙動が分かる。
- ✓ 多くのヒストリーを繰り返して、偶然の要素を排除する必要がある。
- ✓ 物質内での放射線挙動を第一原理的に再現するため計算精度が良い。

# PHITS計算結果の例

$^{137}\text{Cs}$  から放出された100,000個の光子の挙動をPHITSで模擬

no. = 1, ie = 1, iz = 1, it = 1



数多くの放射線挙動を模擬することにより、全体的な挙動(平均値)を導出

# 参考: 4次元飛跡情報の可視化機能



# PHITSで扱う物理現象

## 衝突・崩壊過程

### 原子核反応

- 高エネルギー核破碎反応
- 核分裂反応
- 吸収・原子核共鳴反応

### 原子反応

- 光電効果・コンプトン散乱・電子対生成
- モラー/バーバー散乱、対消滅・制動放射
- ノックアウト電子( $\delta$ 線)生成
- 電離/励起(飛跡構造解析モードのみ)

### 粒子崩壊

- 寿命による崩壊( $\mu$  &  $\pi$ 粒子、中性子 etc.)

## 輸送過程

### 電離・励起

- 連続エネルギー損失近似(CSDA)
- エネルギー・角度分散

### 外部場/反射

- 電磁場
- 重力
- 反射面(スーパーミラー etc.)

# PHITSに組み込まれている物理モデル

	中性子	陽子・ $\pi$ 粒子 (その他の核子)	重イオン	$\mu$ 粒子	電子・ 陽電子	光子
		1 TeV	1 TeV/u	1 TeV		1 TeV
高 ↑ エネルギー ↓ 低	核内カスケード模型 (JAM) 3 GeV + 蒸発模型 (GEM)		JAMQMD + GEM	仮想光子 核反応 JAM/JQMD + GEM 200 MeV	EGS5 or 飛跡構造解析	EPDL97 or EGS5 + GEM + JENDL + NRF
	核内カスケード模型 (INCL4.6) + 蒸発模型 (GEM) 200 MeV	t $^3\text{He}$ $\alpha$	量子分子 動力学模型 JQMD + GEM			
	20 MeV	核データライブラリ JENDL-5.0	d 10 MeV/u	電離損失 ATIMA 1 keV		
	核データ ライブラリ JENDL-4.0 or JEND-5.0 (e-mode) 0.1 meV	1 MeV	ATIMA or 飛跡構造解析			
			原子・原子核の 負ミューオン捕獲	飛跡構造 解析 1 meV		

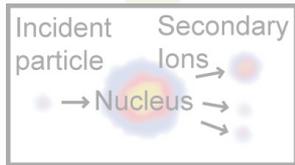
モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能

# ソフトウェア発生までの各過程のシミュレーション方法

## ① 環境放射線情報



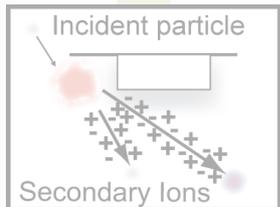
- ✓ 実測値に基づく経験式 (M. S. Gordon, etc.)
- ✓ 宇宙線スペクトル計算モデル (PARMA, etc.)



## ① 核反応過程

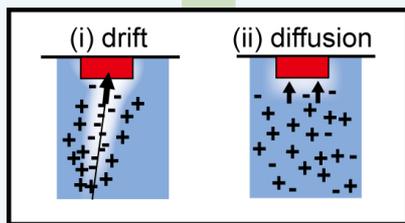


- ✓ 放射線挙動解析コード (PHITS, MCNP6, Geant4, etc.)



## ② 電荷付与過程

- ✓ 阻止能計算モデル (SRIM & TRIM, etc.)  
※ イオン入射の場合のみ



## ③ 電荷収集過程



- ✓ デバイスシミュレータ (HyENEXSS, Sentaurus, ATLAS, etc.)
- ✓ 有感領域モデル (SSVモデル, MSVモデル)

## ④ 回路・システム応答



- ✓ しきい電荷量 (臨界電荷量) による判定
- ✓ 電子回路シミュレータ (SPICE, etc.)

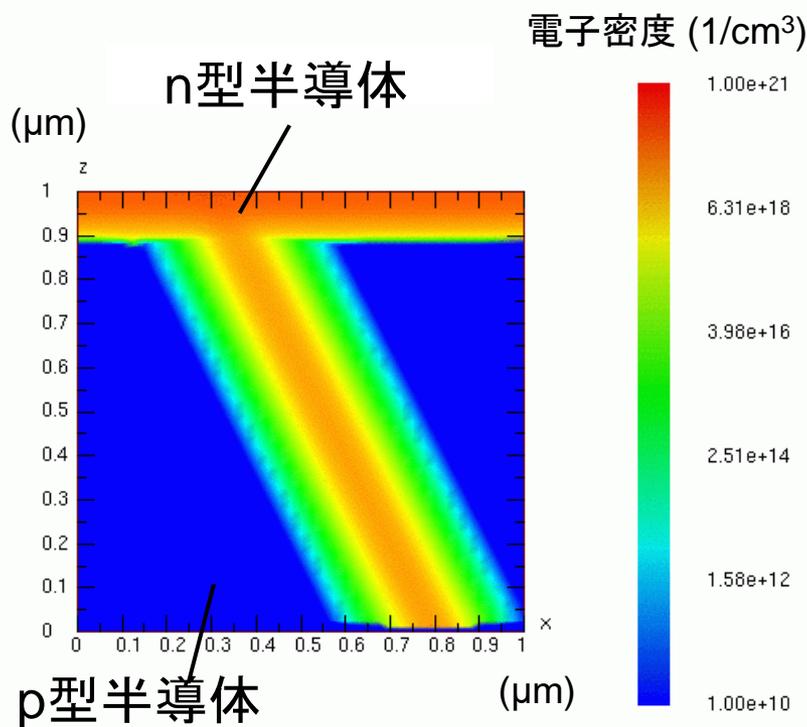
# 三次元TCADシミュレータ HyENEXSS

Hyper Environment for Exploration of Semiconductor Simulation

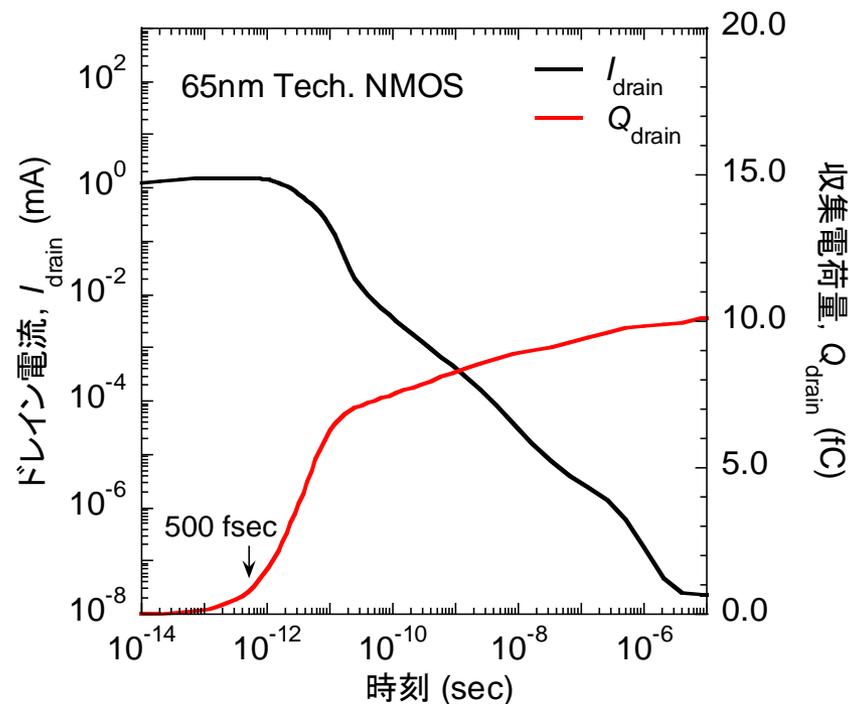
(※TCAD: 半導体素子の製造過程および過渡応答を解析するシミュレータの総称)

プロセスシミュレータとデバイスシミュレータを内蔵した  
三次元TCADシミュレータ

本研究では、三次元デバイスシミュレータ”HyDeLEOS”を使用し、  
ドリフト-拡散法による電荷収集過程の過渡解析を実施

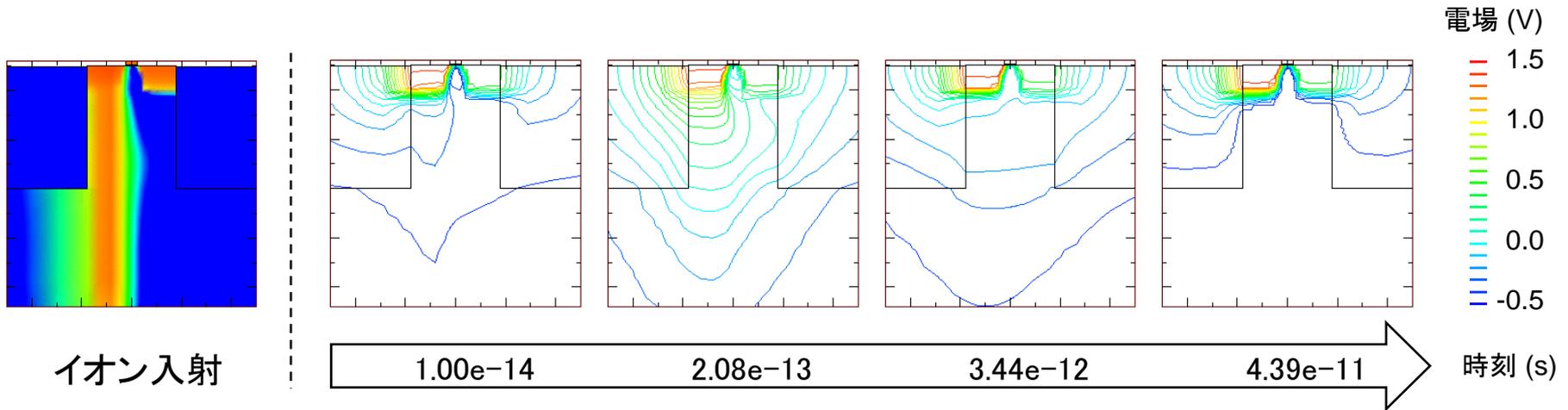


pn接合ダイオード中の付与電荷の時間発展

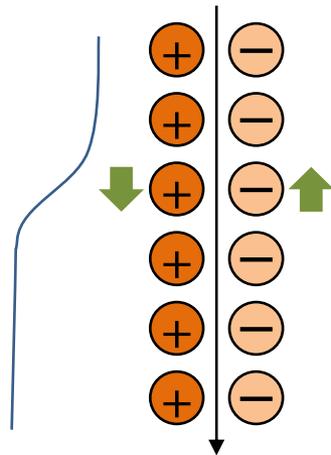


NMOSFETの過渡解析結果の一例

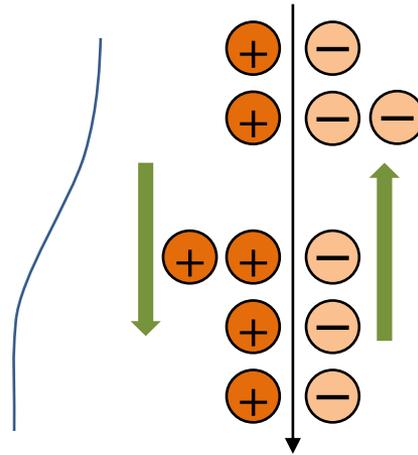
# ドリフト(ファネリング)による電荷収集のメカニズム



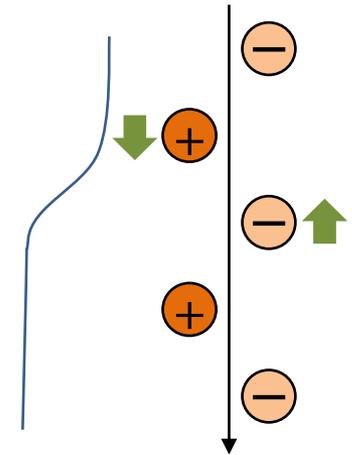
電極



① 空乏層の電界により  
付与電荷が分極



② 分極により電界が広がり  
より深い領域へ影響



③ 電荷が少なくなると  
電界の歪みが解消

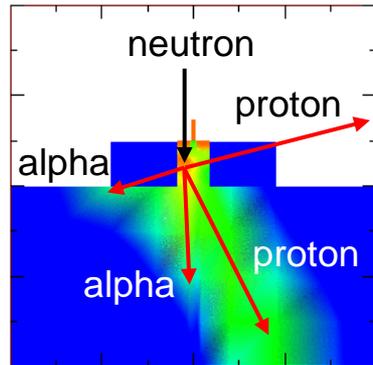
イオントラックによる電場の歪みは数十ps程度で解消

# 参考: 統合シミュレーションコードシステム PHYSERD

PHITS-HyENEXSS integrated code System for Effect of Radiation on Device

## PHITS

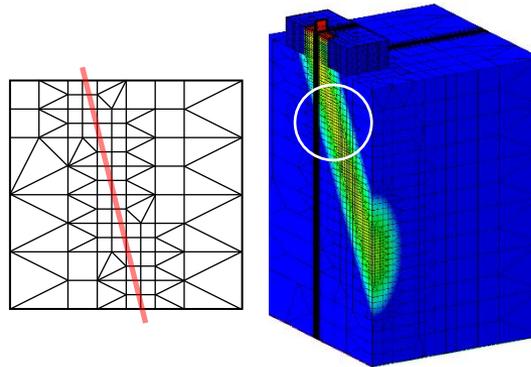
半導体デバイス内での放射線の核反応および輸送を計算



## takomesh

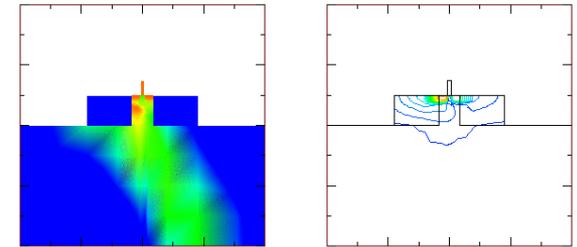
柴野望己, 修士論文,  
筑波大学, 2010.

ソフトエラー解析に最適なメッシュ構造を生成するインターフェイスツール



## HyENEXSS

デバイスに付与された電荷の過渡応答を解析、収集電荷量を算出



- ✓ 詳細なソフトエラー解析は、対策法の有効性検証などに有効
- ✓ 過渡応答解析に時間がかかる(1ヒストリー数時間～十数時間)ため、迅速なSER評価には不向き

# 有感領域 (SV, Sensitive Volume) モデル

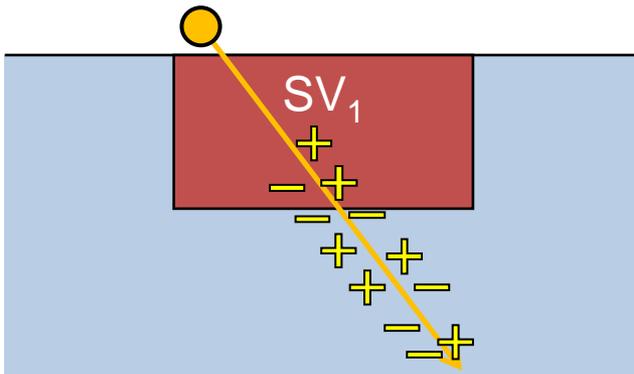
## 有感領域内の付与電荷量から、収集電荷量を概算するモデル

$$Q_{coll} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times Q_{dep,i}$$

$Q_{coll}$  : 収集電荷量  
 $Q_{dep,i}$  :  $i$ -th SV における付与電荷量  
 $\alpha_i$  :  $i$ -th SV における電荷収集効率

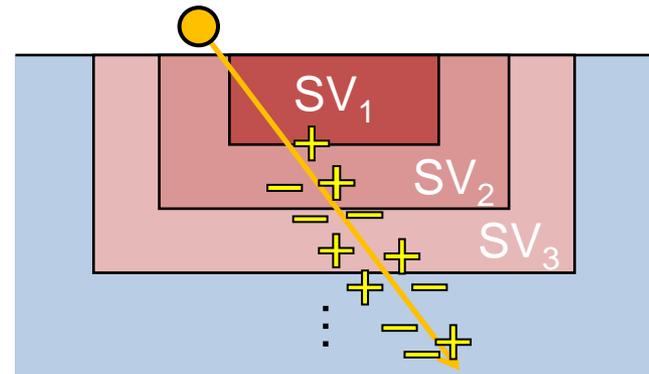
### ○ 単一有感領域 (SSV) モデル

- ✓ 有感領域は1つ
- ✓ 電荷収集効率は1.0



### ○ 多重有感領域 (MSV) モデル

- ✓ 複数の有感領域
- ✓ 各有感領域の電荷収集効率は HyENEXSS で算定



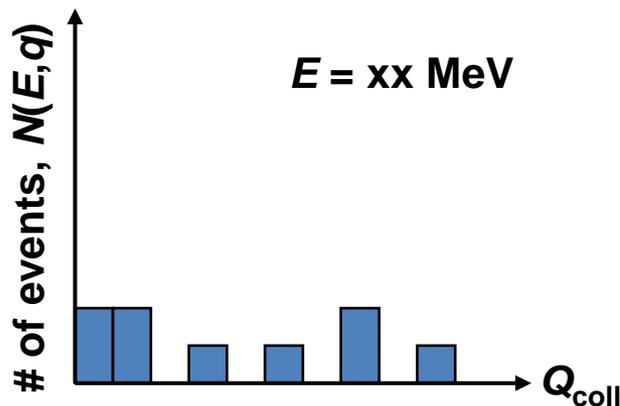
# SEU断面積の算出

1. PHITSで、半導体デバイスへの放射線入射計算を行う。
2. HyENEXSS or SVモデルで、そのヒストリーの収集電荷量を計算
3. 手順1,2を繰り返し、収集電荷量のヒストリー数分布  $N(q)$  を算出
4. しきい電荷量  $Q_{fit}$  を下限として  $N(E, q)$  を積分し、SEU断面積  $\sigma_{SEU}(E, Q_{fit})$  を算定

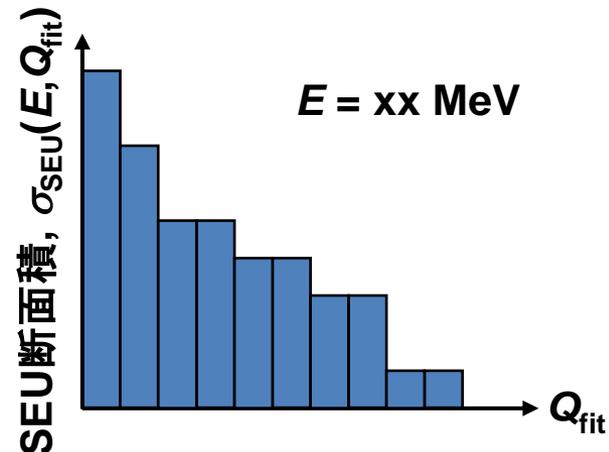
$$\sigma_{SEU}(E, Q_{fit}) = \frac{A}{N_{in} N_{bit}} \int_{Q_{fit}}^{\infty} N(E, q) dq$$

$\sigma_{SEU}(E, Q_{fit})$  : SEU断面積  
 $E$  : 放射線入射エネルギー  
 $Q_{fit}$  : しきい電荷量

$A$  : 中性子照射面積  
 $N_{in}$  : 中性子入射数  
 $N_{bit}$  : メモリビット数



各収集電荷量のヒストリー数分布

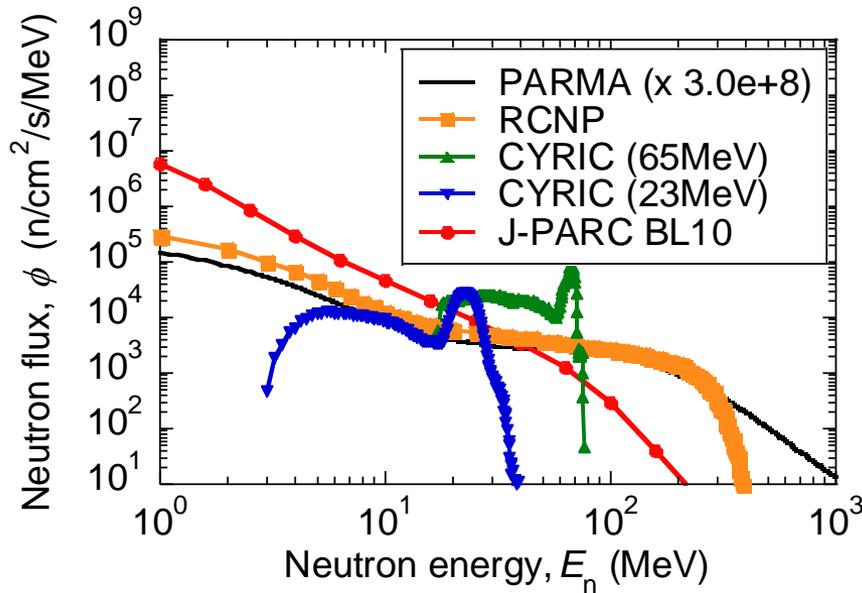


しきい電荷量に関するSEU断面積

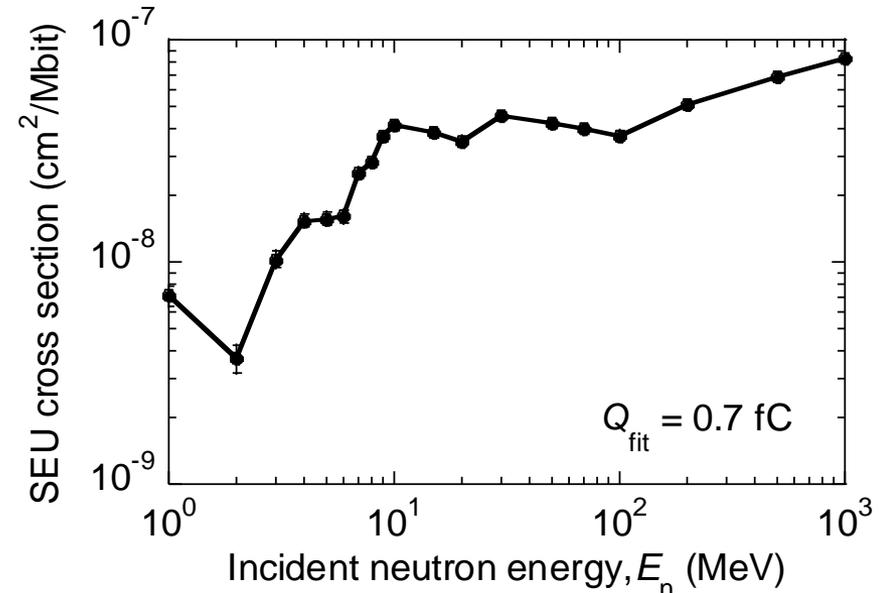
# SERの算定

## 5. SEU断面積と放射線フラックスの積をエネルギー積分し、SERを算定

$$SER(Q_{fit}) = \int \phi(E) \times \sigma_{SEU}(Q_{fit}, E) dE$$



様々な中性子照射施設における  
中性子フラックス



あるしきい電荷量における  
中性子エネルギーに関するSEU断面積

# 話す内容

---

- ソフトエラーの概要
- シミュレーションの概要
- **研究成果の紹介**

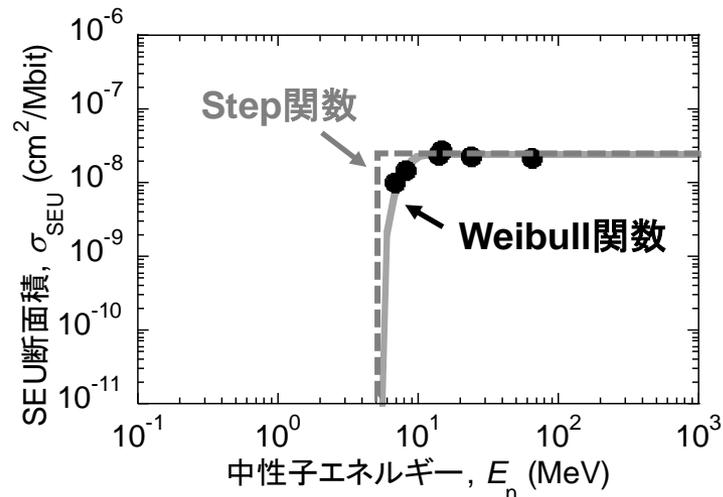
$$SER_{GND}(Q_{fit}) = \int \underbrace{\phi_{GND}(E_n)}_{\text{環境中性子フラックス(既知)}} \times \underbrace{\sigma_{SEU}(Q_{fit}, E_n)}_{\text{SEU断面積(未知, デバイスに依存)}} dE_n$$

環境中性子フラックス(既知)

SEU断面積(未知, デバイスに依存)

## 従来手法

エネルギーの異なる中性子照射試験で得た測定値を、Weibull関数でフィッティングしてSEU断面積を導出 ... **最低4つ測定値が必要**  
(※ 1点の測定値とStep関数で概算する方法もある)

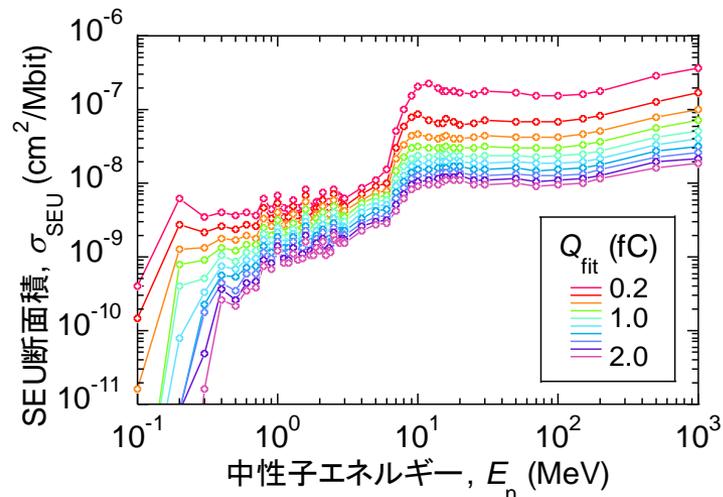


## 着想

- シミュレーションにより、SEU断面積の中性子エネルギー依存性を導出可能
- 可変パラメータは、しきい電荷量  $Q_{fit}$  のみ

**測定値1つ**で  $SER_{GND}$  評価が可能では？

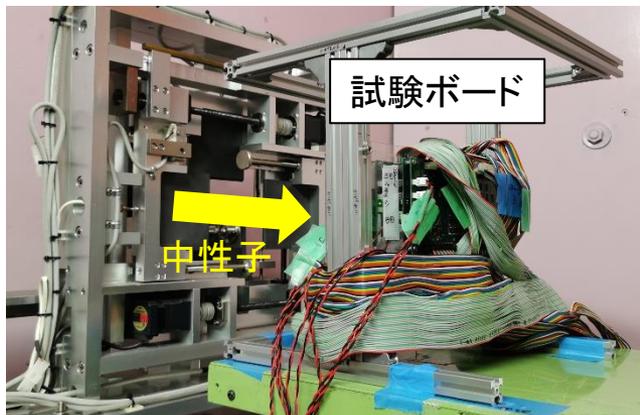
従来より低コスト、エネルギーの制約も緩和!



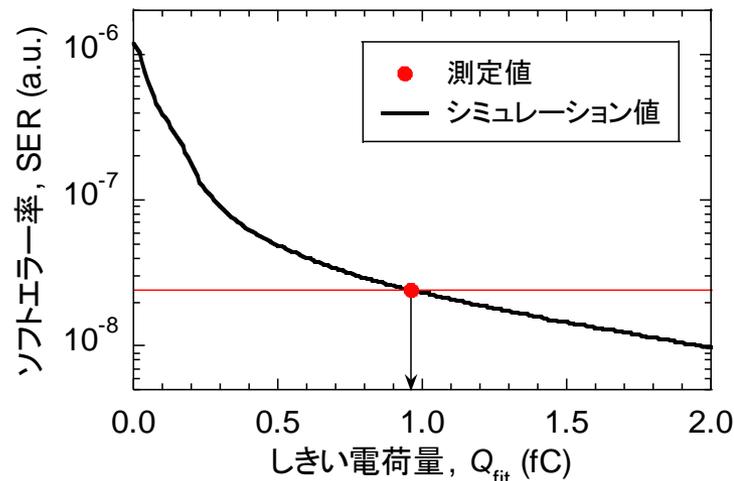
①

# 新たな地上環境SER ( $SER_{GND}$ ) の評価手法の開発

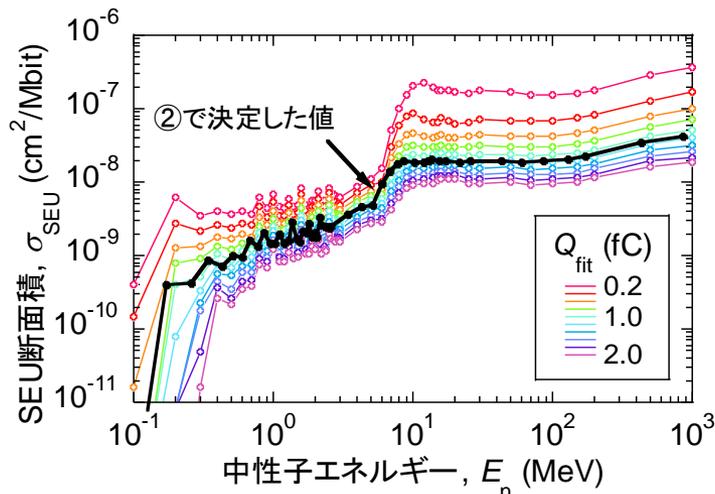
- ① 任意の中性子源でSERを測定  
(地上環境を再現しない施設で良い)



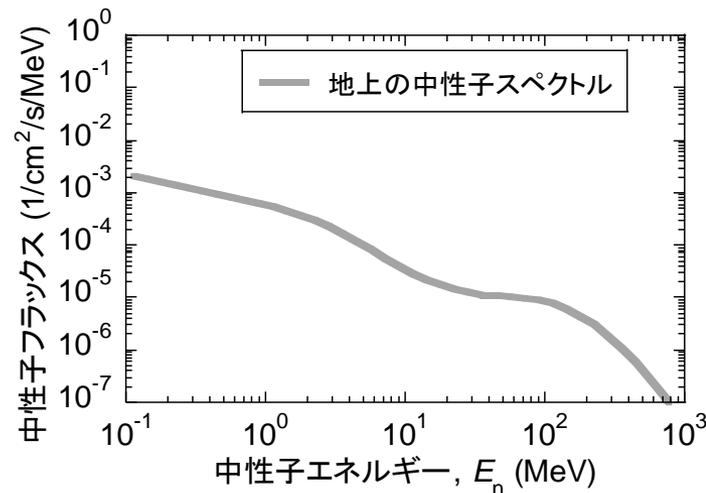
- ② 測定結果からシミュレーションの  $Q_{fit}$  を決定



- ③ シミュレーションで得たSEU断面積に地上の中性子フラックスを乗じて積分

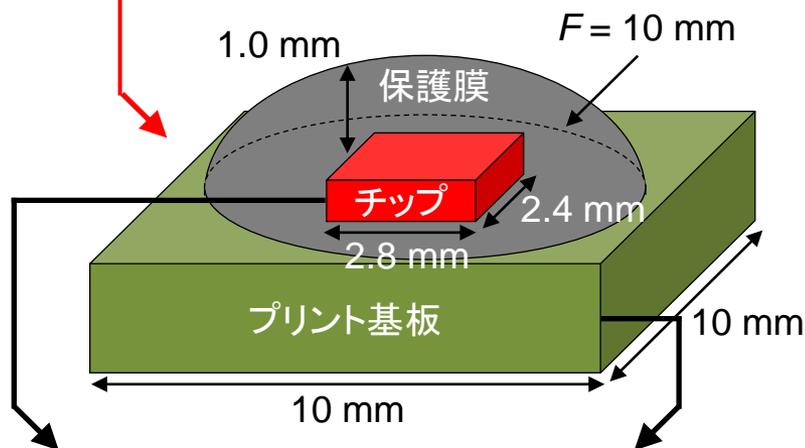
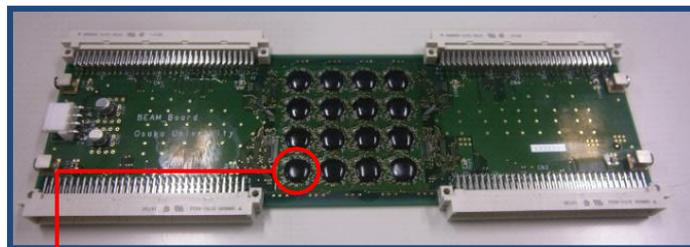


×



**J-PARC BL10 (連続スペクトル)**, **東北大 (準単色)**, **産総研 (単色)** にて設計ルール65nmのBulk SRAMのSERを測定し、これを用いて提案手法の有効性を評価

# 新たな地上環境SER ( $SER_{GND}$ ) の評価手法の開発



- Epoxy resin  
 $(C_{22.9}H_{26.1}O_{4.3})$   
 & Stiffener  
 $(C_9H_{10}O_3)$   
 & Silica ( $SiO_2$ )
- Polyimide  
 $(C_{23}H_{0.9}O_7N_{2.4})$   
 &  $Si_3N_4$   
 & Ti/Alクラッド材  
 &  $SiO_2$

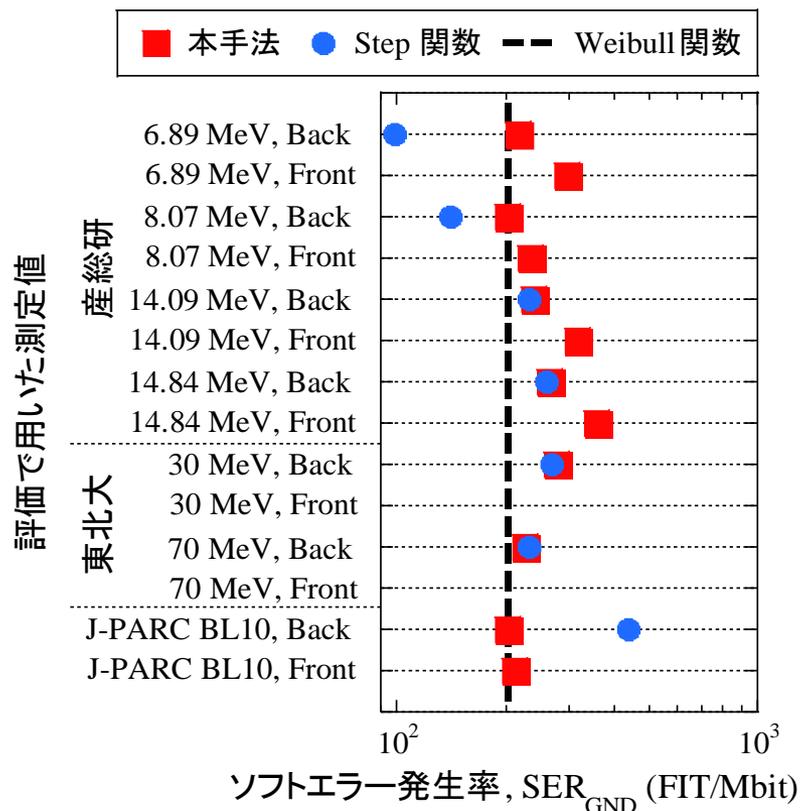
5.5 $\mu m$	積層構造
2.43 $\mu m$	配線層
0.35 $\mu m$	絶縁層
10 $\mu m$	メモリアレイ
290 $\mu m$	基板

エポキシ	100 $\mu m$
プリプレグ	200 $\mu m$
エポキシ	35 $\mu m$
コア材	930 $\mu m$
エポキシ	35 $\mu m$
プリプレグ	200 $\mu m$
エポキシ	100 $\mu m$

- Cu &  $SiO_2$
- $SiO_2$
- Silicon
- Epoxy resin  
 $(C_{15}H_{16}O_2)$
- Carbon  
 & Epoxy resin  
 $(C_{15}H_{16}O_2)$

測定で用いた試験ボードとモデル化した計算体系

Ref.) S. Abe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 70, p. 1652 (2023).



## 成果

評価に用いる測定値によらず、概ね首尾一貫した $SER_{GND}$ が得られ、Weibull関数法による結果とも良好な一致を示した。

提案手法の妥当性・有用性を定量的に明らかにした。

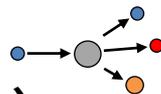
本評価手法が国際標準規格に策定されるように活動中

## SER評価の国際標準文書

加速試験でのSER評価の際、多くの場合は  
中性子の照射方向依存性は無い

### 着想

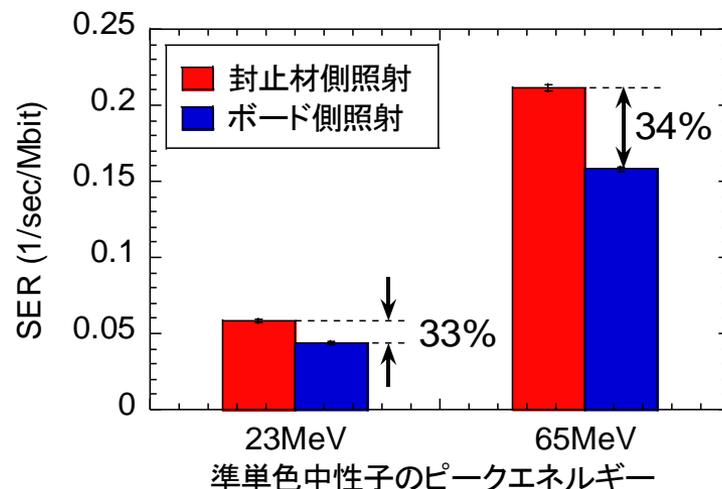
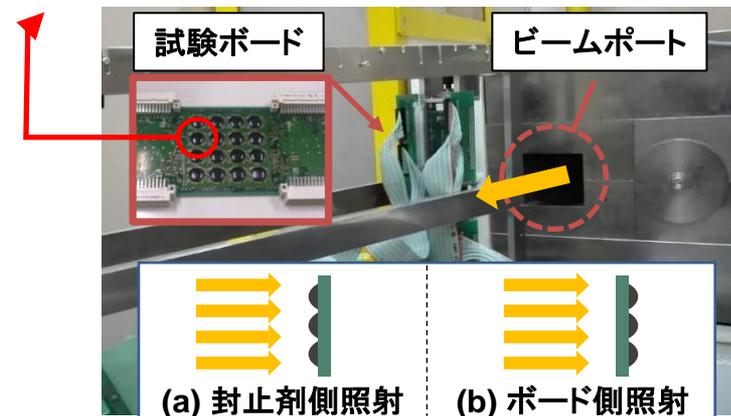
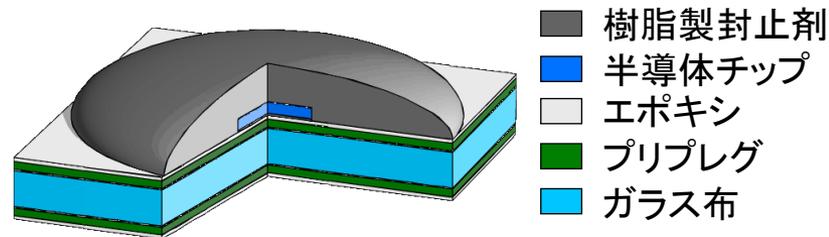
- 二次イオンは**前方**に放出され易い
- 二次イオンの生成量は**標的**に依存



半導体チップ前方の標的が変わるため  
**測定値は照射方向に依存するのでは？**

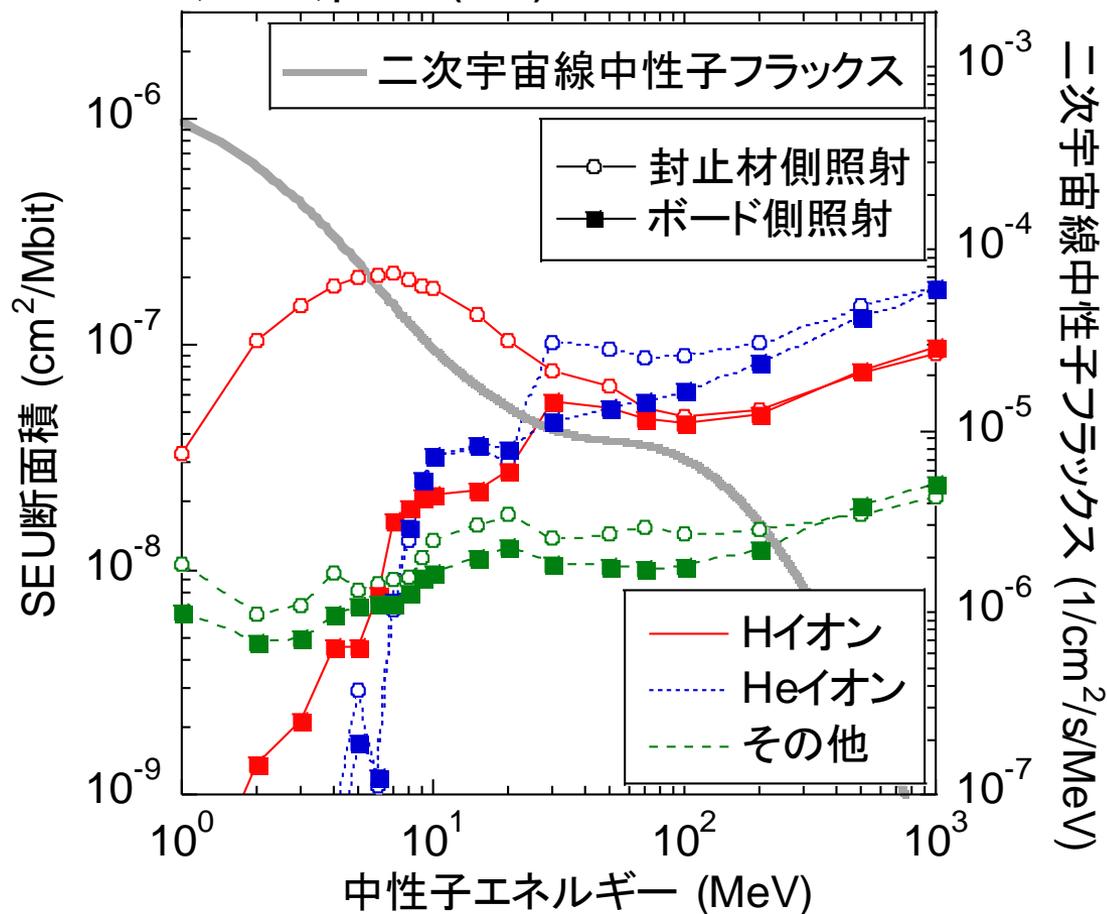
**実験** 封止剤側から照射した方が  
SERが高くなる！

**測定値の差の原因を  
シミュレーションで解明**



準単色中性子照射実験のセットアップ(上)  
および 各条件のSER測定値(下)

Ref.) S. Abe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 66, p. 1374 (2019).



## 成果

- 入射中性子と材料中の水素元素との弾性散乱が原因と解明
- ➡ 測定値の補正等で有益な知見、SER評価の高精度化に貢献
- ➡ 水素非含有物(セラミック等)の採用で、SERが低減可能

## ● ミューオン

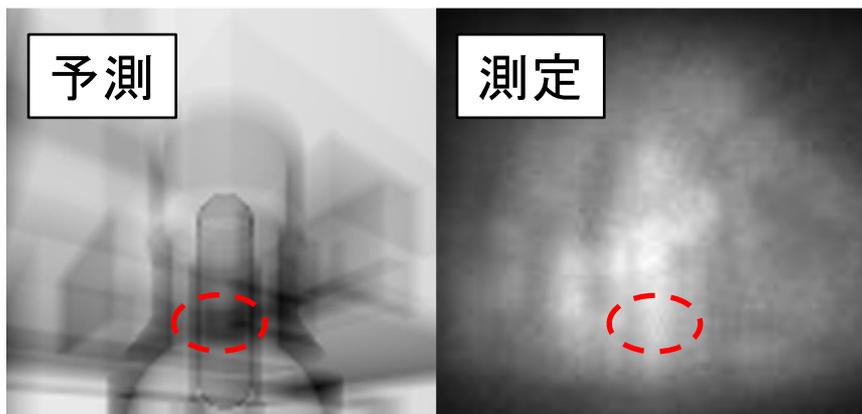
- 第二世代の荷電レプトン
- 質量:  $105.6 \text{ MeV}/c^2$  (電子の200倍)
- 発生機構: パイオン崩壊など

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu, \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

- 寿命:  $2.19703 \times 10^{-6}$  秒

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

## ● ミューオン応用研究



### ミューオン透過法による原子炉調査

引用) 高崎史彦, 日本保全学会第12回学術講演会, 2015年7月

## ● ミューオン源

- 二次宇宙線ミューオン
- ミューオンビーム施設

CERN(スイス)

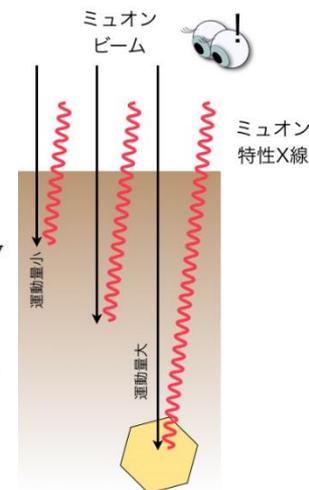
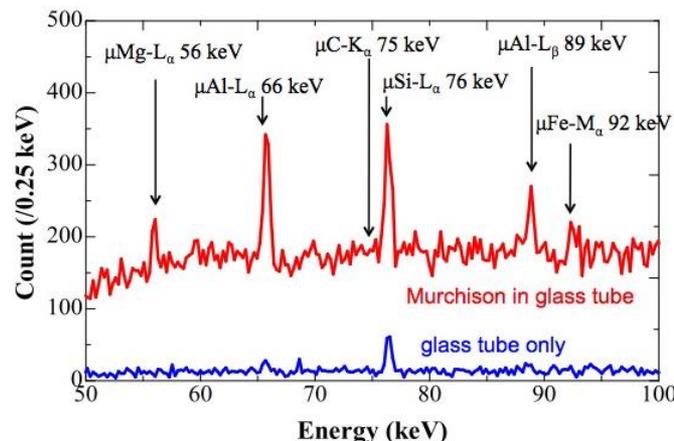
PSI(スイス)

RAL(イギリス)

TRIUMF(カナダ)

J-PARC(日本)

RCNP(日本)



### ミューオン特性X線を用いた隕石の元素分析

引用) <http://j-parc.jp/ja/topics/2014/Pulse140527.html>

通説: 地上のソフトエラーは環境中性子が主因、**環境ミュオンの影響はほぼ無し**

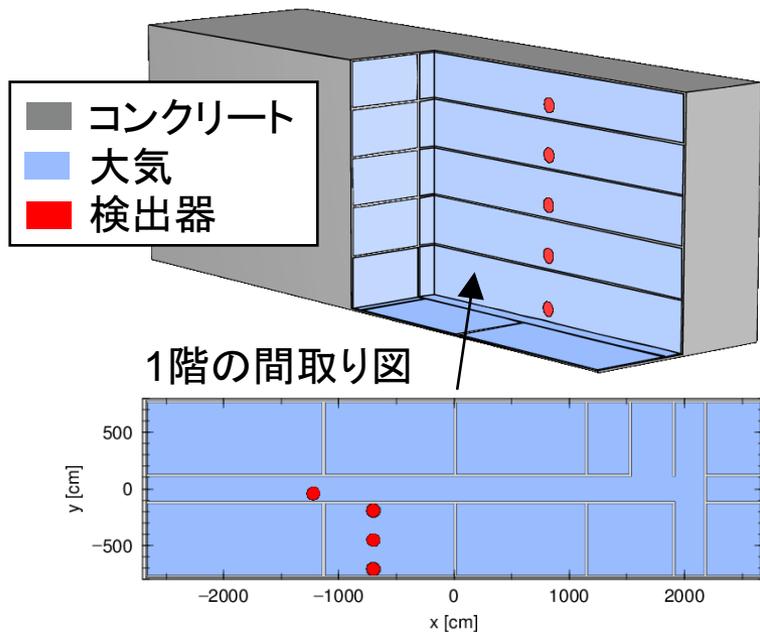
疑問: (1) 実際の機器は建屋内のサーバー筐体に設置される。

(2) 中性子と比べてミュオンの透過能力は高い。

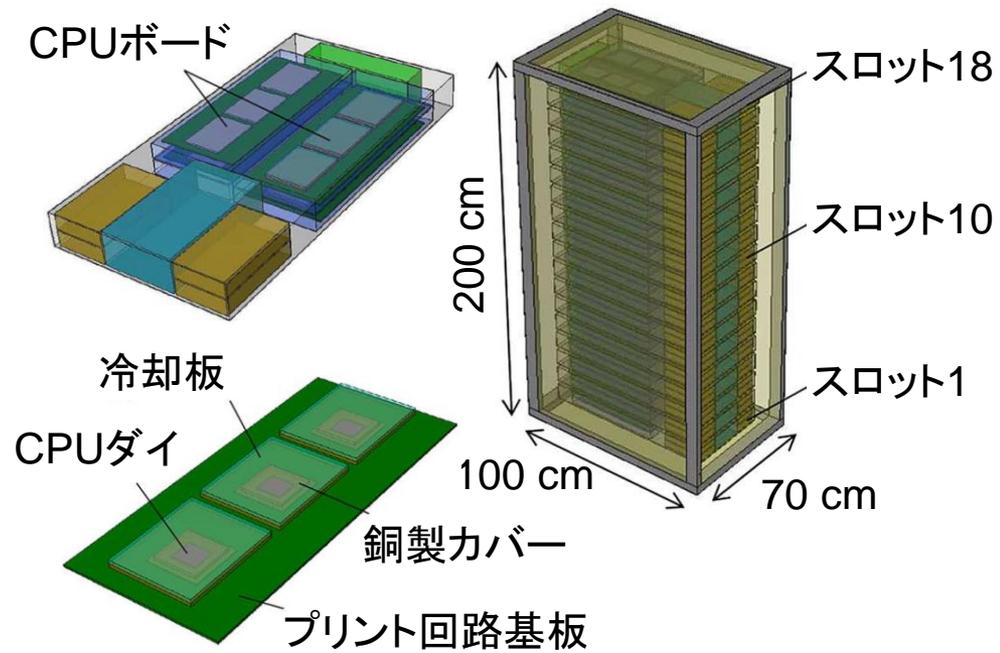
(3) ミュオンは標的原子核との相互作用を通じて二次イオンを生成する。

## 目的

建屋・サーバー筐体による放射線遮蔽効果を考慮した上でソフトエラー評価への環境ミュオンの影響を明らかにする。

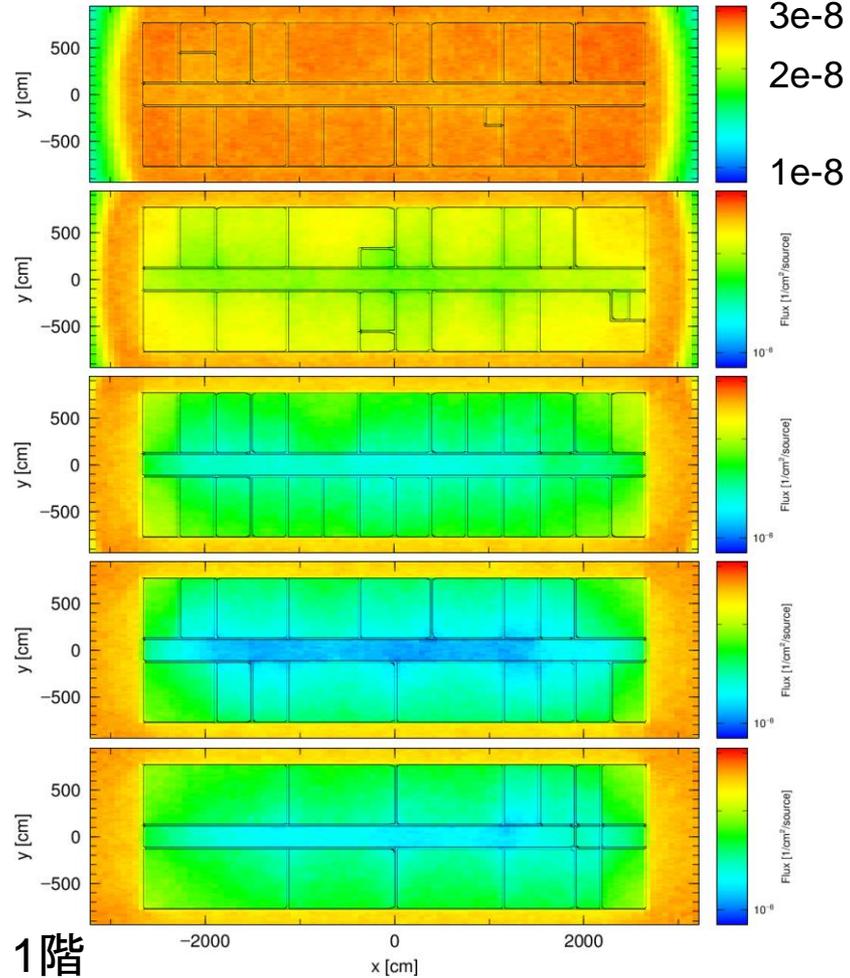


実在する建屋を模擬した計算体系



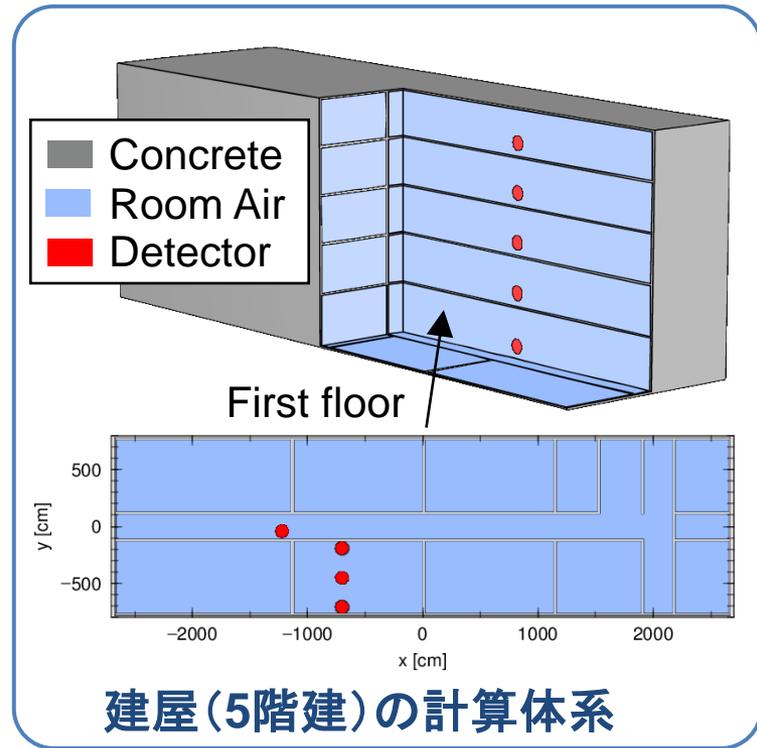
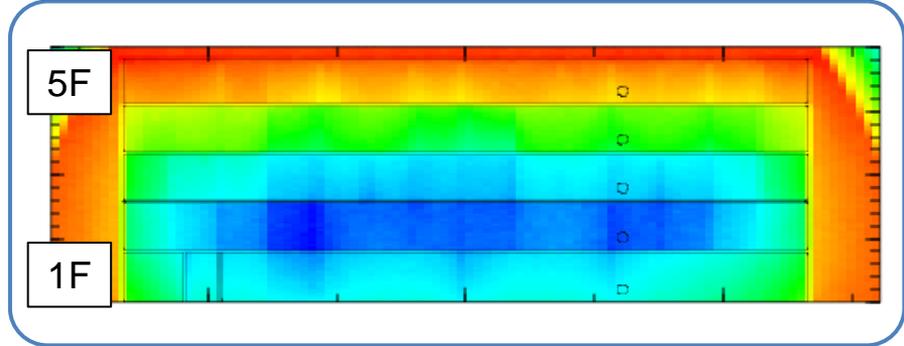
サーバー筐体の計算体系

5階 flux (1/cm<sup>3</sup>)



1階

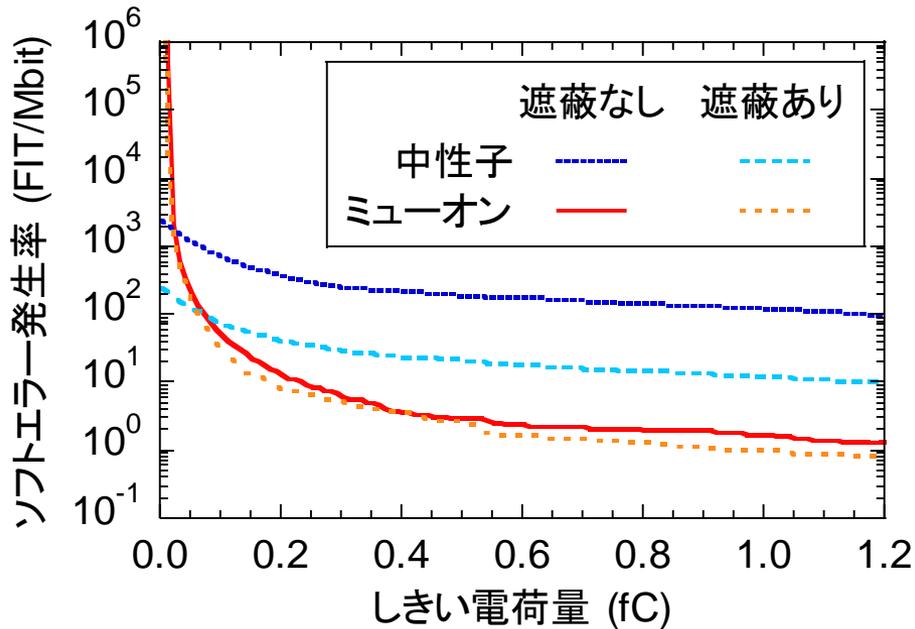
建屋内の中性子フラックス



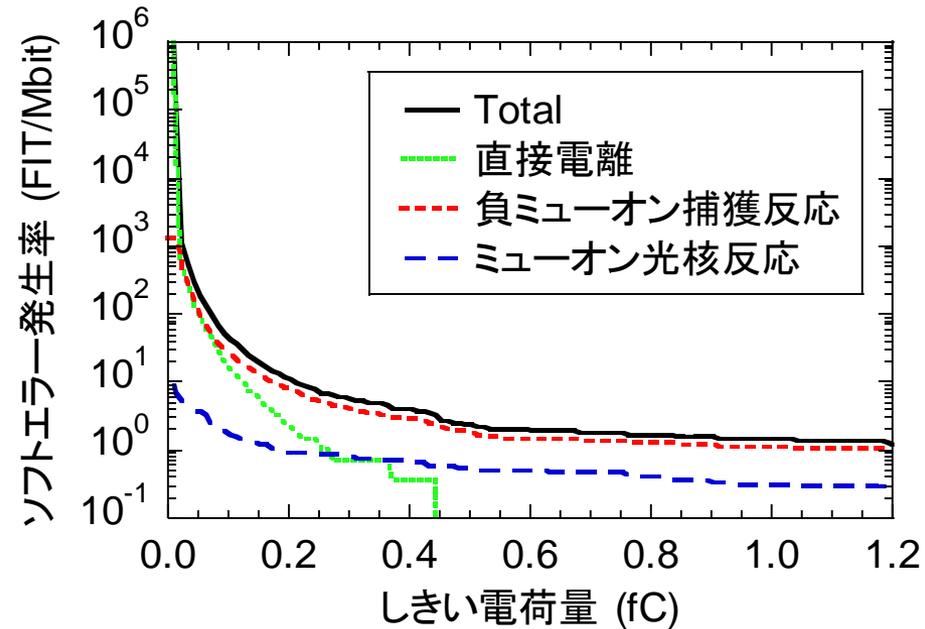
建屋(5階建)の計算体系



Ref.) S. Abe et al., Proc. RADECS2016, PE06 (2016).



各環境におけるソフトウェア発生率



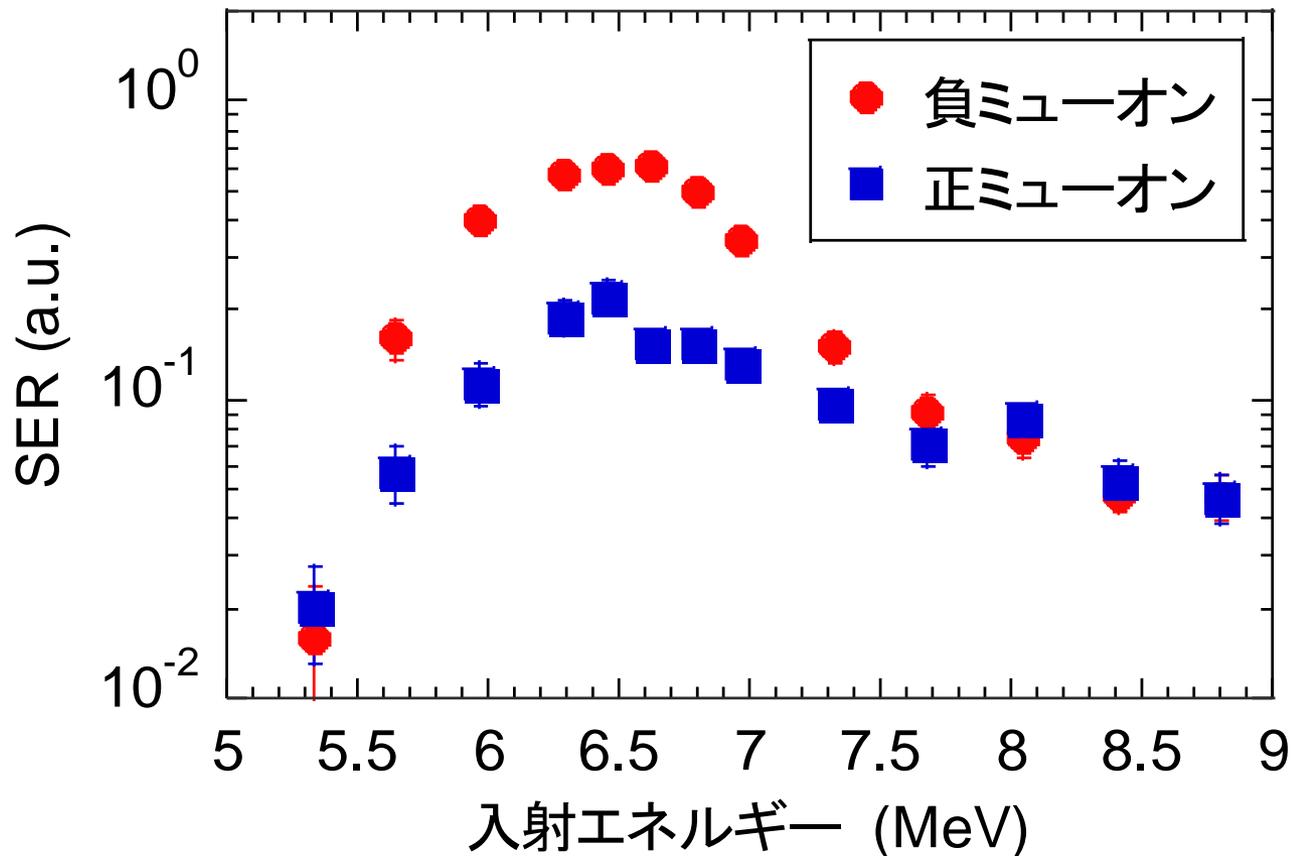
ミュオン起因ソフトウェアエラーへの各物理過程の寄与

- ✓ 建屋1階に配置したサーバー筐体では、SERの12%はミュオンが原因

**無視できないレベルの影響**

- ✓ 負ミュオン原子核捕獲反応が主因
- ✓ しきい電荷量が低くなると直接電離の影響でSERが急増する。

Ref.) S. Manabe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 65, p. 1742 (2018).



J-PARC MUSEでのミューオン照射実験結果

**負ミューオン捕獲反応**がソフトエラーを多く引き起こす事を  
シミュレーション・実験の双方より**世界で初めて実証!!**

# まとめ

- 一般的な地上環境においても、空から降り注ぐ放射線によって電子機器のソフトエラーが引き起こされる。
- それぞれの部品が必要とされる信頼性を有するかを評価することが重要。
- 実測的な評価手法は強力だが、全ての部品を実測するのは難しいため、シミュレーションによる評価が有用。
  - 実測では分からない情報をシミュレーションで得られる。
  - 実測的な評価の前段階の検討手段としても有用。
- 研究成果をいくつか紹介