

# JT-K124

## 通信装置の粒子放射線影響の概要

Overview of particle radiation effects on telecommunication systems

第2版

2022年5月19日制定

一般社団法人  
情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。

内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

## 目 次

<参考>.....	4
要約.....	5
キーワード.....	5
まえがき.....	5
1. 適用.....	6
2. 引用規格.....	6
3. 定義.....	6
3.1 他で定義されている用語.....	6
3.2 本標準で定義する用語.....	6
4. 略語と頭字語.....	6
5. 慣例.....	7
6. 粒子放射線によるソフトエラー発生メカニズム.....	7
6.1 ソフトエラーを発生させる粒子放射線.....	7
6.2 地理的条件および太陽活動がソフトエラー発生率に与える影響.....	10
6.3 建物および装置の設置条件がソフトエラー発生率に与える影響.....	12
6.4 ソフトエラーの種類.....	13
7. 通信装置で発生するソフトエラーの影響と対策.....	14
7.1 通信装置で増加するソフトエラー.....	14
7.2 ソフトエラーが通信装置の動作へ及ぼす影響.....	14
7.3 通信装置のソフトエラー対策.....	16
8. ソフトエラーに対する標準の必要性.....	17
9. 通信装置の開発手順.....	18
参考文献.....	19

## <参考>

### 1. 国際勧告との関連

本標準は、2022年1月にITU-Tにて承認されたITU-T勧告K.124に準拠したものである。

### 2. 上記国際勧告等との相違点

なし

### 3. 改版の履歴

版数	発行日	改版内容
第1版	2018年11月15日	制定 (ITU-T K.124 (12/2016) 準拠)
第2版	2022年5月19日	制定 (ITU-T K.124 (1/2022) 準拠)

### 4. 工業所有権

本標準に関わる「工業所有権等の実施の権利に係る確認書」の提出状況は、TTCホームページでご覧になります。

### 5. その他

なし

### 6. 標準作成部門

伝送網・電磁環境専門委員会

## 要約

本標準は、[ITU-T K.124]に従い粒子放射線によって引き起こされ、通信システムに影響を及ぼすソフトウェアに関する基本的なガイダンスを提供する。粒子放射線によって生じるソフトウェアの現象について詳述するとともに、ソフトウェアに対する設計、試験、対策手順について簡単に説明している。

## キーワード

LSI、中性子、粒子放射線、シングルイベントアップセット、ソフトウェア

## まえがき

通信装置がより高集積化された半導体デバイスを使用するにつれて、粒子放射線が引き起こすソフトウェアがキャリア通信ネットワークで頻繁に発生し、ネットワーク保守や信号伝送品質に深刻な影響を及ぼすようになってきている。したがって、通信装置のソフトウェア対策が必要となってきた。通信サービスを提供するため、通信装置は大量に導入し、遠隔で監視を行う。1 台の通信装置のソフトウェアであっても、適切なソフトウェア対策設計がなされていないと致命的なサービス影響を及ぼす可能性がある。そのため通信装置の設計、開発段階で、ソフトウェアの影響を把握し、システムの目標品質を達成するためのソフトウェアの追加対策を行うことが重要である。

## 1. 適用

本標準は、粒子放射線により発生するソフトウェアの影響とその対策設計法に関する概要を述べる。通信センタビルに設置されキャリア通信ネットワークを構成する通信装置であるコア系（リンク/ノード）装置およびアクセス系装置に適用できる。

## 2. 引用規格

[JT-K130] TTC標準 JT-K130 (2/2019), *通信装置の中性子照射試験法*

[JT-K131] TTC標準 JT-K131 (2/2019), *通信装置のソフトウェア対策設計法*

[JT-K138] TTC標準 JT-K138 (5/2019), *粒子放射線試験に基づく対策のための品質推定方法とアプリケーションガイドライン*

[JT-K139] TTC標準 JT-K139 (5/2019), *通信装置の粒子放射線影響の信頼度基準*

[TR-KSup.11] TTC技術レポート TR-KSup.11 (2/2019), JT-K131補足資料-FPGAにおけるソフトウェア対策

## 3. 定義

本標準では、以下の用語を定義する。

### 3.1 他で定義されている用語

なし

### 3.2 本標準で定義する用語

#### 3.2.1 中性子照射試験：neutron irradiation test

小形加速器中性子源を用いた中性子照射によるソフトウェア品質評価手段

#### 3.2.2 ソフトエラー：Soft error

半導体デバイス内のデータの1または複数ビットが反転する現象。半導体デバイス自体の損傷ではない。

#### 3.2.3 ソフトエラー発生率：Soft error rate

単位時間当たりのソフトウェア発生数

## 4. 略語と頭字語

本標準では次の略語を使用する。

CRAM Configuration Random Access Memory

DICE Dual Interlocked Storage Cell

ECC Error Correction Code

EUT Equipment under test

試験対象装置

FIT	Failure In Time	
FPGA	Field-Programmable Gate Array	
LSI	Large Scale Integration	大規模集積回路
MCU	Multiple Cell Upset	
NE	Network Equipment	ネットワーク装置
RCC	Replication, Comparison, Checkpointing	
SCU	Single Cell Upset	
SEB	Single-Event Burnout	
SEL	Single-Event Latch-up	
SEU	Single-Event Upset	
SRAM	Static Random Access Memory	
TMR	Triple Modular Redundancy	

## 5. 慣例

なし

## 6. 粒子放射線によるソフトウェア発生メカニズム

ソフトウェアとは半導体デバイス自体が壊れるのではなく、保持しているデータの一部のビットが反転してしまう事象である。半導体デバイス自体は非破壊であるため、ソフトウェアにより反転したビットの書き直しや、半導体デバイスの再起動による初期設定化で正常動作状態に修復する。本章では、ソフトウェア要因となる粒子放射線の発生現象と半導体デバイス内でソフトウェアが発生するメカニズムについて説明する。

### 6.1 ソフトエラーを発生させる粒子放射線

ソフトウェアは主に粒子放射線の中性子線および $\alpha$ 線によって引き起こされる。中性子線は宇宙線により生成され、 $\alpha$ 線は半導体デバイスの材料に含まれる微量な放射性同位元素から生成される。

#### 6.1.1 $\alpha$ 線によるソフトウェア発生メカニズム

集積回路を形成するパッケージ材料や配線材料には、ウラン  $^{238}\text{U}$ 、トリウム  $^{232}\text{Th}$  のような放射性同位元素が微量に含まれる。これらの放射性同位元素から生成された $\alpha$ 線が集積回路を構成する材料内に入射すると、図 6.1 に示すように、その飛程に沿って電子正孔対が発生し、空乏層内近傍でドリフトなどによってメモリセルに収集される。この収集された電荷が半導体ゲート固有の臨界量を超えたとき、メモリセル内のビットの反転 ( $0 \rightarrow 1$  または  $1 \rightarrow 0$ ) が起こる。

$\alpha$ 線によるソフトウェアの発生は低 $\alpha$ 線樹脂のような高純度材料を採用することによって低減することができる。

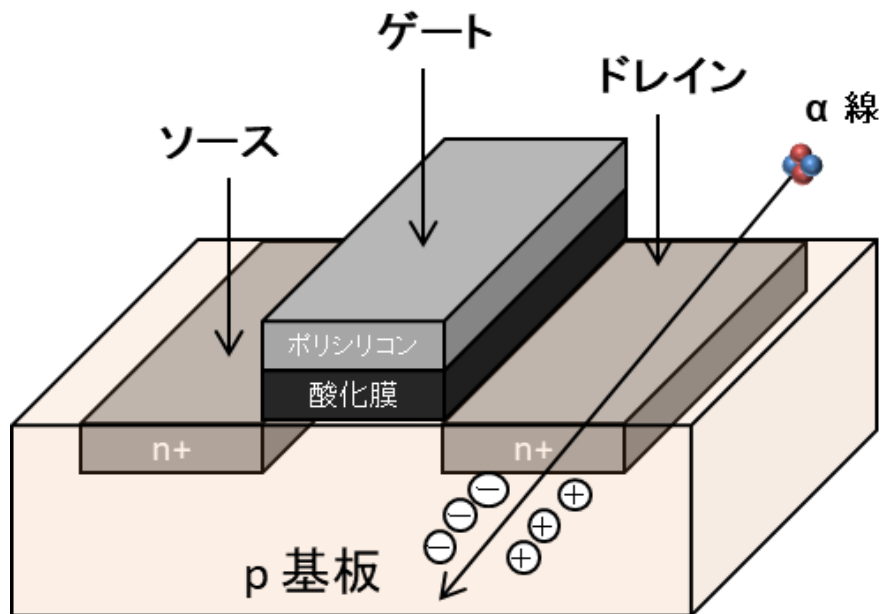


図 6.1 ソフトエラーを引き起こす半導体材料への  $\alpha$  線の入射

### 6.1.2 宇宙線によるソフトエラー発生メカニズム

宇宙で飛び交っている宇宙線には超高エネルギー粒子が含まれている。図 6.2 に示すように 2 種類の宇宙線がソフトエラーを引き起こす。太陽活動によって生成された放射線である太陽宇宙線と太陽系外から飛来する銀河宇宙線である。両方の宇宙線とも、電子、陽子、 $\alpha$  粒子などから構成されている。

宇宙線が地球の大気に突入すると大気中の原子核と衝突し核反応を起こし、中性子、 $\pi$  中間子、電子、陽子などの二次粒子が発生する。この中で、電荷を持たない中性子は大気中でのエネルギーや密度の減衰が少ない。地表における中性子エネルギースペクトルを図 6.3 に示す。

中性子のエネルギーによって半導体デバイスにてソフトエラーを引き起こすメカニズムが異なる。中性子エネルギーが 1MeV 以上の高速中性子は半導体デバイス中の Si 原子核と核反応を起こし、これにより発生した二次イオンがソフトエラーを引き起こす。中性子エネルギーが 25meV 程度の熱中性子は半導体デバイス中の  $^{10}\text{B}$  との捕獲反応を起こし  $\alpha$  粒子を生成し、ソフトエラーを引き起こす。

図 6.4 に高速中性子によるソフトエラー発生メカニズムを示す。高速中性子が半導体デバイス内の原子(Si 原子など)と衝突するとある確率で核反応を起こす。この核反応によって二次イオンが生成される。生成された二次イオンの飛程に沿ってデバイス内に電子正孔対が発生し、ソフトエラーが引き起こされる。



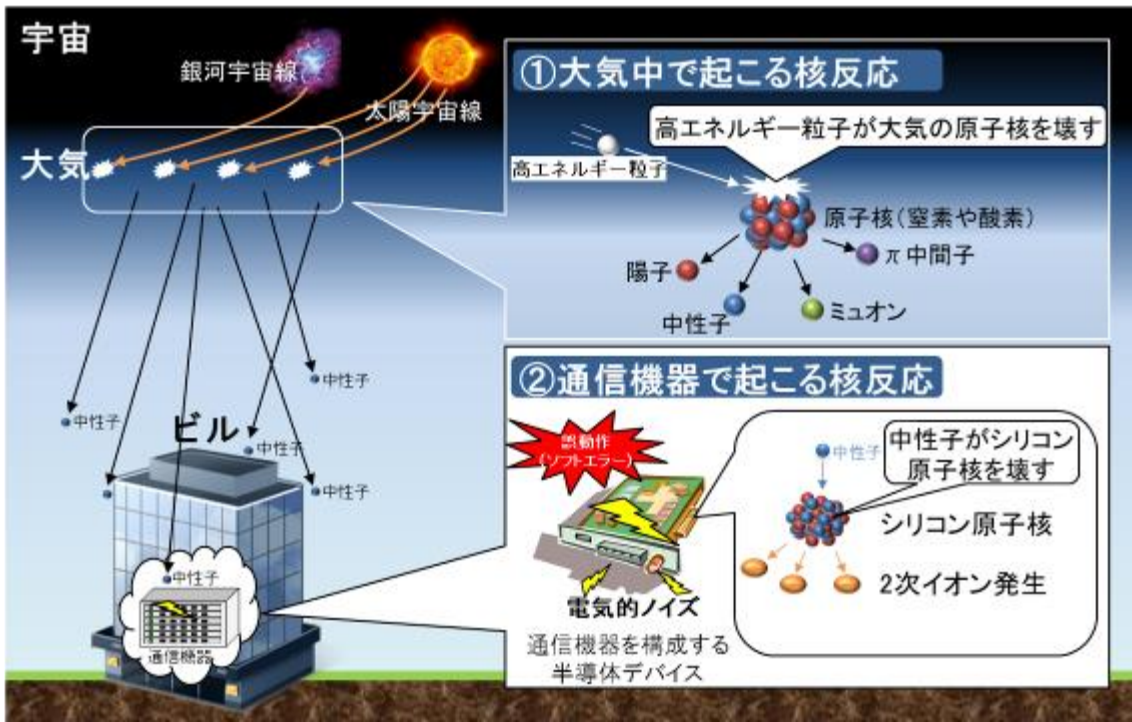


図 6.2 宇宙線によるソフトウェア発生メカニズム

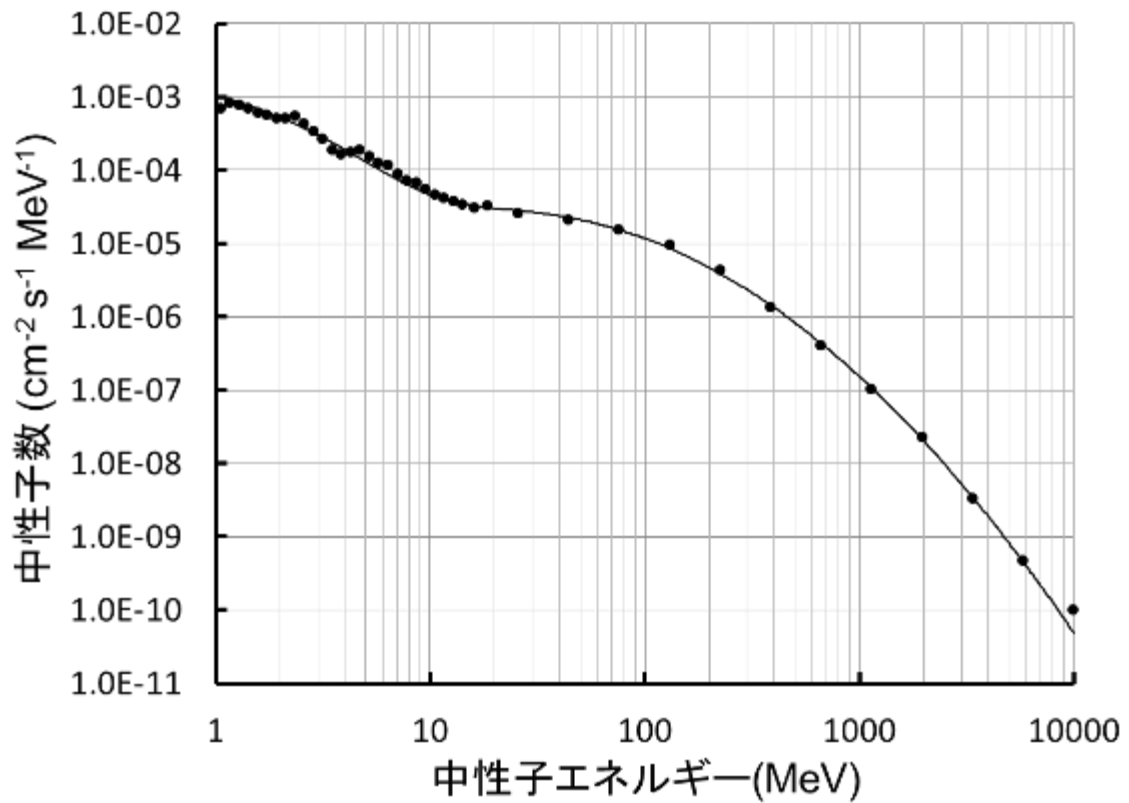


図 6.3 ニューヨーク海面レベルにおける高エネルギー中性子スペクトラム [b-JEDEC]

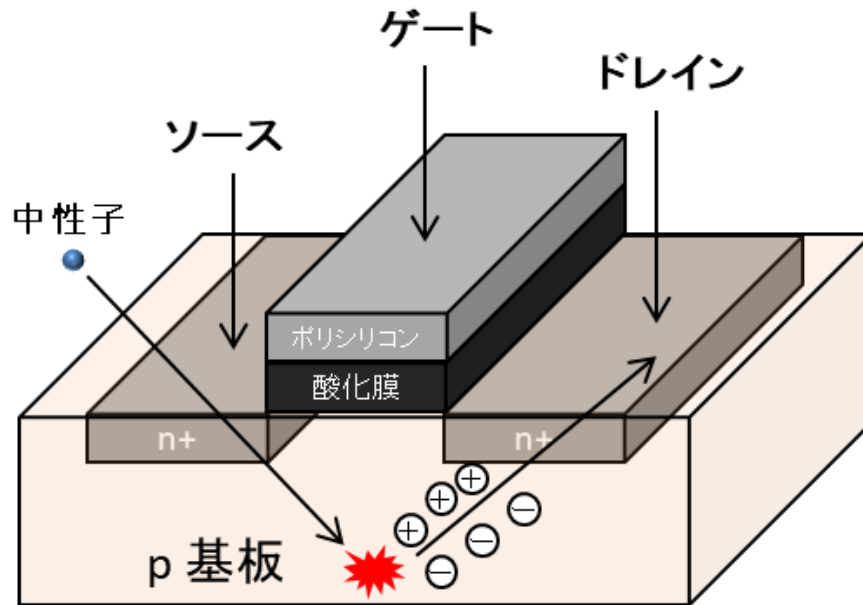


図 6.4 ソフトエラーを引き起こす高エネルギー中性子の入射

## 6.2 地理的条件および太陽活動がソフトエラー発生率に与える影響

宇宙線起因の中性子数は、地理的条件（地球上の位置、高度）および太陽活動によって変動し、ソフトエラー発生率に影響を及ぼす。中性子線は高い高度の大気中で発生するため、高度が高いほど中性子数が多く、高度が低くなるにつれて中性子数は少なくなる。中性子数と高度の関係を図 6.5 に示す。

また、大気中で中性子線を発生させる宇宙線高エネルギー陽子は+電荷を持っているため磁場の影響を受ける。そのため、地磁気によって生成される磁場の反発力がより強く宇宙線が反発される赤道付近では、宇宙線起因の中性子線はより少なくなる。逆に、北極、南極などの高緯度地域では磁場の反発力が弱いため、中性子数は多くなる。ニューヨークを基準とした世界代表都市の中性子数の比率を表 6.1 に示す。

さらに、中性子数は太陽活動の影響も受ける。太陽活動は約 11 年周期で活発な時期と静かな時期がある。太陽活動が活発になると、太陽磁場が強くなり太陽系の中に入り込む銀河宇宙線が減少し、地球に降り注ぐ中性子数も少なくなる。しかし、巨大な太陽フレアが発生した場合は、放射される太陽宇宙線が莫大に増加するため、太陽宇宙線により一時的に中性子数が増えることがある。宇宙線変動量と太陽黒点数の変化を図 6.6 に示しており、太陽黒点数が減少すると太陽活動が活発になることを示している。

これら地理的条件および太陽活動に依存する中性子数は、宇宙線の飛程と大気との衝突反応の計算機シミュレーションによって求めることができる。その結果、特定の地域、太陽活動におけるソフトエラーの発生率は、ニューヨークを基準とした宇宙線による中性子数の相対比率により評価できる。

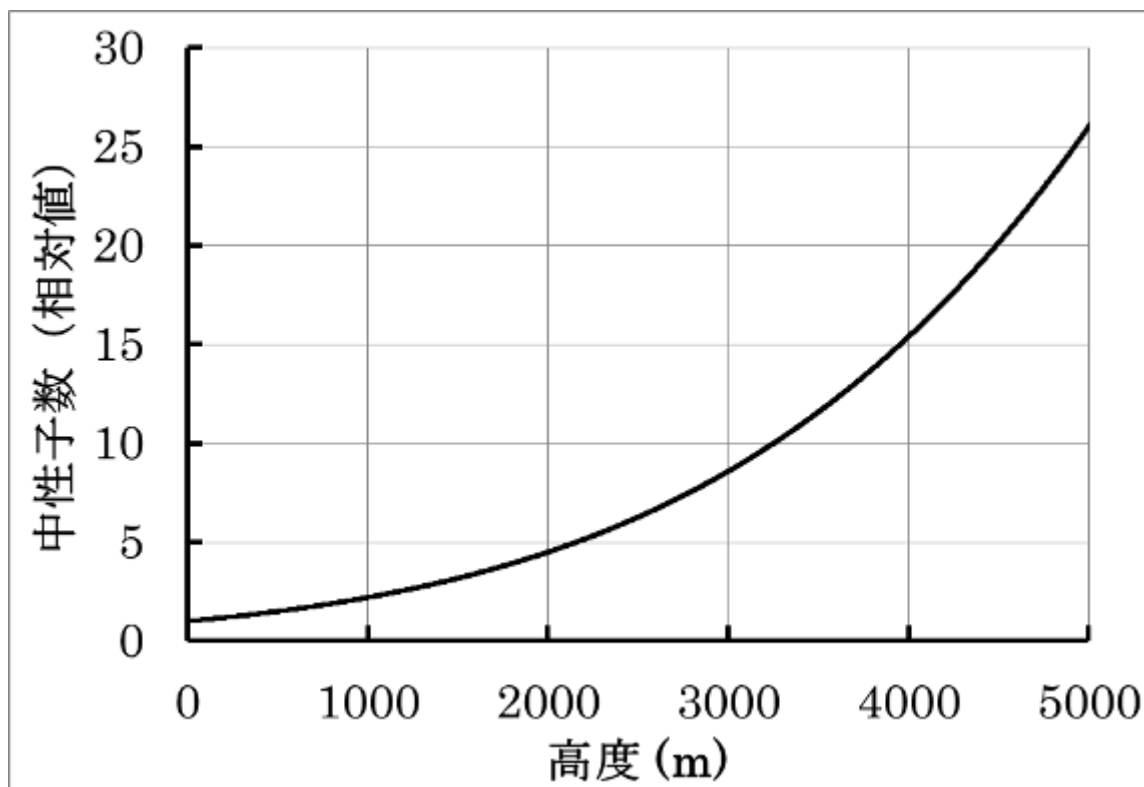


図 6.5 中性子数と高度の関係

表 6.1 ニューヨークを基準とした各都市の宇宙線起因の相対中性子数[b-JEDEC]

都市、地域	緯度 (°)	経度 (° E)	高度 (m)	大気密度 (g/cm <sup>2</sup> )	Cutoff Rigidity (GV)	相対中性子数		
						最小	最大	平均
バンコク、タイ	13.4N	100.3	20	1031	17.4	0.51	0.53	0.52
北京、中国	39.9N	116.4	55	1027	9.4	0.71	0.76	0.73
ベルリン、ドイツ	52.5N	13.4	40	1028	2.8	0.94	1.08	1.01
ボゴタ、コロンビア	4.6N	285.9	2586	753	12.3	3.7	4	3.85
シカゴ、米国	41.9N	272.4	180	1011	1.8	1.09	1.28	1.19
デンバー米国	39.7N	255	1609	851	2.8	3.43	4.08	3.76
香港、中国	22.3N	114.2	30	1030	16.1	0.53	0.56	0.55
ヒューストン、米国	30N	264.6	15	1031	4.6	0.88	0.98	0.93
ヨハネスブルグ、南 アフリカ	26.2S	28	1770	834	7.1	2.95	3.3	3.13
ラパス、ボリビア	16.5S	291.9	4070	623	12.2	8.59	9.39	8.99
ロンドン、イギリス	51.5N	359.9	10	1032	2.9	0.91	1.05	0.98
ロサンゼルス、米 国	34N	241.7	100	1021	5.3	0.89	0.99	0.94
メキシコシティ、メ キシコ	19.4N	260.9	2240	787	8.4	3.75	4.16	3.96
モスクワ、ロシア	55.8N	37.6	150	1015	2.2	1.06	1.22	1.14
ニューデリー、イン ド	28.6N	77.2	220	1007	14.1	0.66	0.7	0.68
ニューヨーク、米国 (基準)	40.7N	286	0	1033	2.08	0.927	1.073	1
パリ、フランス	48.9N	2.3	50	1027	3.6	0.92	1.04	0.98
シアトル、米国	47.6N	237.7	50	1027	2	0.97	1.13	1.05
ソウル、韓国	37.6N	127	50	1027	10.7	0.66	0.71	0.69
シドニー、オースト	33.9S	151.2	30	1030	4.5	0.87	0.97	0.92

ラリア								
シンガポール	1.3N	103.9	15	1031	17.2	0.51	0.53	0.52
ストックホルム、スウェーデン	59.3N	18.1	30	1030	1.4	0.96	1.12	1.04
トロント、カナダ	43.7N	280.6	120	1019	1.5	1.04	1.22	1.13
東京、日本	35.7N	139.8	20	1031	11.6	0.62	0.66	0.64

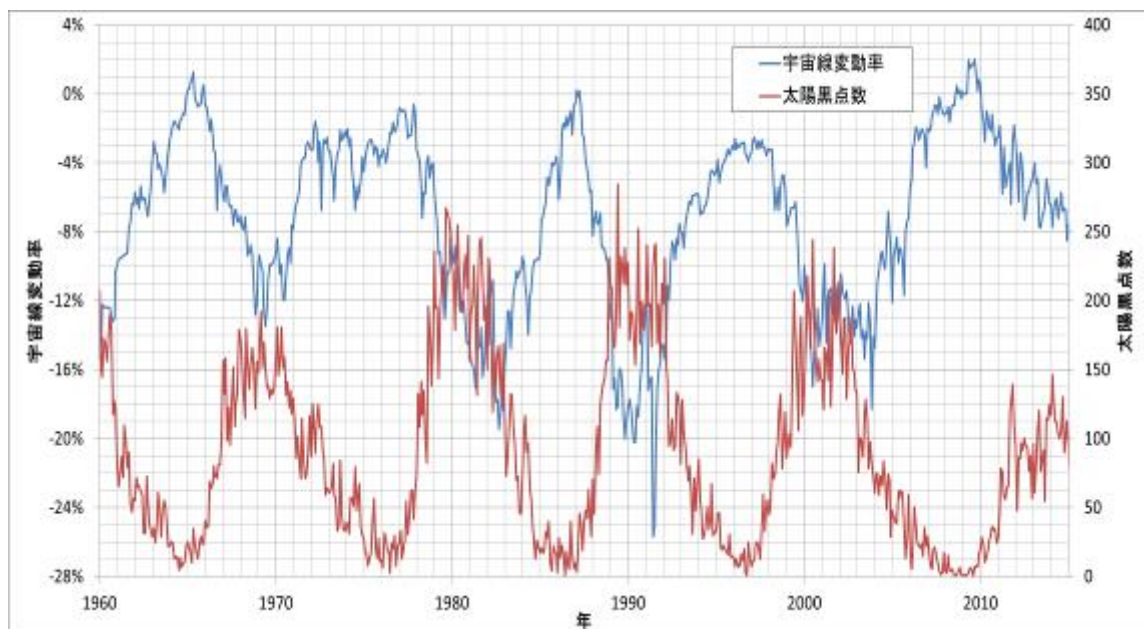


図 6.6 宇宙線変動率と太陽黒点数の変化[b-SILS] [b-Moscow]

### 6.3 建物および装置の設置条件がソフトエラー発生率に与える影響

中性子は、水素のような軽元素を含む物質内を通過するとエネルギーを失う。そのため、コンクリート製のビルの壁やその他の構造物はある程度中性子を減少させ、ソフトエラー発生率を低くすることができる。図 6.7 に、ソフトエラー発生率に対応する中性子数の相対値について、通信センタビルを模擬し計算機シミュレーションを行った結果を示す。ソフトエラー発生率はビルの低層階ほど低くなり、ビルの外部に対し、3階で70%、2階で60%、1階で40%になると見積られる。ビルの外壁に近いところより中心部の方が斜めから入射する成分が遮蔽されるためソフトエラー発生率が低くなる。また、窓の有無はほとんど影響を与えない。

また背の高い装置においては、装置下部の中性子数は上部よりも少なくなる。しかし、装置の上部がどれだけ中性子数を減少させるかを評価するには、装置の複雑な構成や装置内デバイスの材料に対する粒子輸送コードを考慮した詳細な計算が必要なため非常に難しい。したがって、本標準では装置による中性子数の減少については考慮しないこととする。

小規模通信装置に関し装置の設置方向すなわち縦置き、横置きによるソフトエラー発生確率への影響は考慮する必要がない。理由は以下の通りである。

- (1) 中性子数に対する装置の遮蔽効果はほとんどない。
- (2) 半導体デバイスの垂直設置、水平設置によってソフトエラー発生率の変動することはない。これは、ソフトエラーは中性子とシリコン原子核との核反応により発生するものであり、この核反応は中性子の入射角度には依存しないためである。

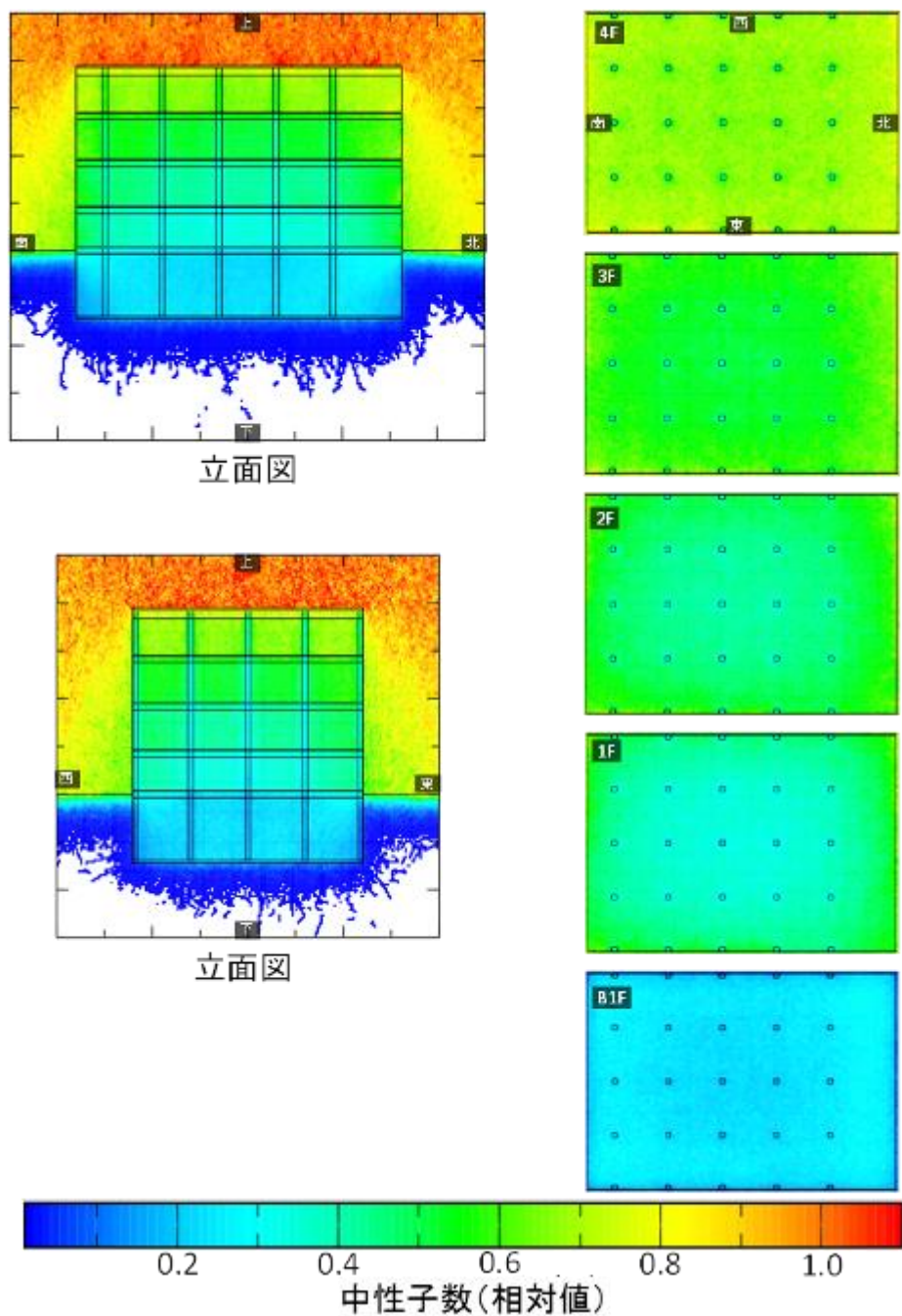


図 6.7 計算機シミュレーションによる通信センター内の中性子数評価  
(建物外部の中性子数との相対値)

#### 6.4 ソフトエラーの種類

粒子放射線が引き起こすソフトエラーの種類は下記の通り分類される。

シングルイベントアップセット (SEU)：ラッチやメモリセルの状態を反転させるエラーを引き起こす動作であり、再書き込みや初期設定により修復できる現象。これには次の2種類がある。

- ・ シングルセルアップセット(SCU)：単一ビットがエラーとなる現象
- ・ マルチセルアップセット(MCU)：複数ビットがエラーとなる現象

シングルイベントラッチアップ(SEL)：再書き込みや初期設定では回復せず電源を落とさないと回復しないエラーを引き起こす現象。例えば、半導体デバイス上に形成されるサイリスタ構造に高エネルギー粒子が当た

り、半導体に過大電流が生じたときに発生する

シングルイベントバーンアウト(SEB)：ハードウェアを損傷するほどの大電流を発生させるに十分な非常に高いエネルギーの粒子により物理故障を引き起こす現象。

SEL と SEB は、発生頻度が非常に稀で、通信装置では問題となっていないため本標準の対象外とする。

## 7. 通信装置で発生するソフトウェアの影響と対策

### 7.1 通信装置で増加するソフトウェア

集積化および微細加工技術の進歩により、半導体デバイスが物理故障となるハードエラーに比べ、ソフトウェアの発生が劇的に増加している。特に、SRAM 素子は高エネルギー中性子の影響を受けやすい。図 7.1 に SRAM ベースの FPGA におけるデザインルールと故障率の関係を示す。[b-IEEE-1]

例えば、SRAM を含む最新版のフィールドプログラマブルロジックアレイ (FPGA) は、ソフトウェア対策を適用しない場合には、Mb 当りのソフトウェア発生率 (FIT/Mb) と FPGA 内のメモリ容量から計算する [b-XILINX1] [b-XILINX2]と、ソフトウェア発生率は 10,000FIT 以上になる。これは、6 個の FPGA を使った装置 1,000 台で構成された通信システムでは、1 日に 1.5 回ソフトウェアが発生することを意味する。

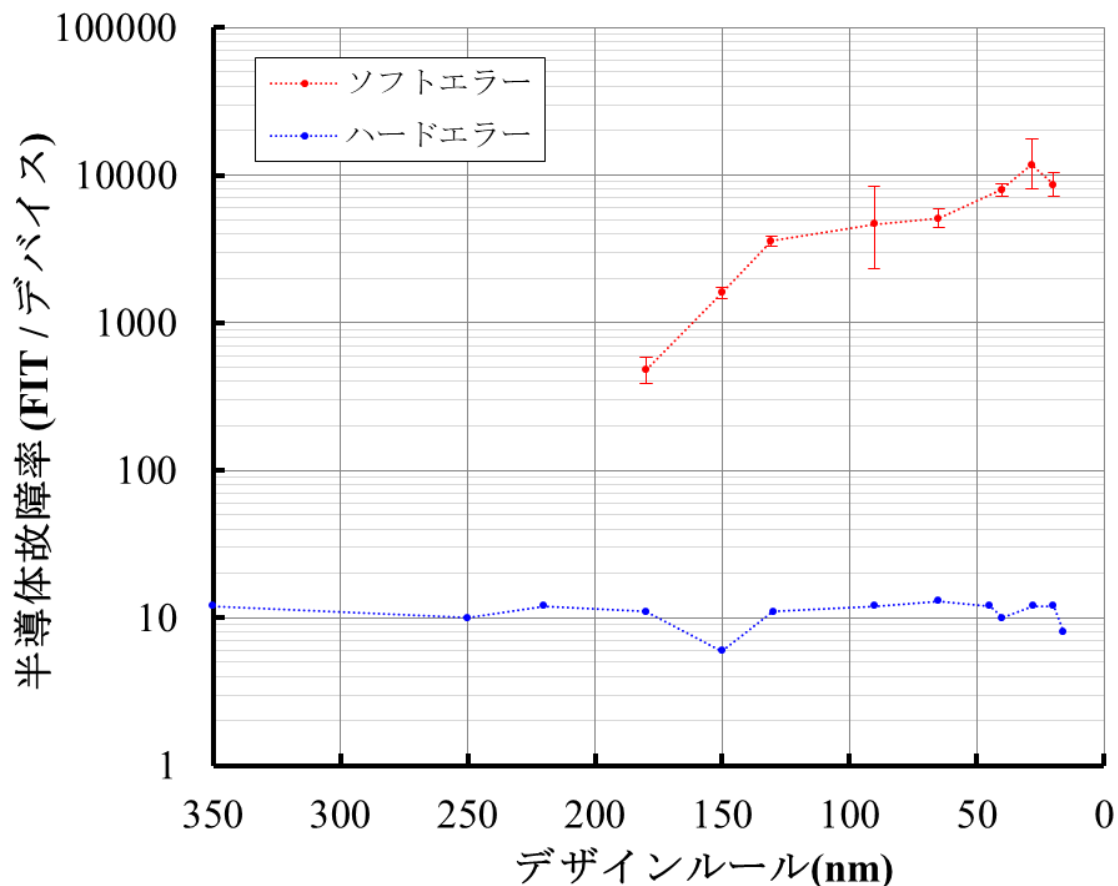


図 7.1 SRAM ベースの FPGA におけるデザインルールと故障率の関係

### 7.2 ソフトエラーが通信装置の動作へ及ぼす影響

ソフトウェアによる通信装置の故障は、実験室で再現できず原因が特定できない未再現故障とユーザ申告前に保守者が故障を検出できないサイレント故障に分類できる。

未再現故障の原因はほとんど実験室や製造ベンダで解明できず、原因調査や装置置換に関連した過剰な費用が発生する。

通信装置は装置内のデバイス故障が発生したときには保守者に警報を発出するように設計するのが一般的である。しかしながら、ソフトエラーは装置で検出できない故障を引き起こし、発生は稀であるが長期間影響を及ぼす。この長時間故障は、社会に重大な悪影響を及ぼす可能性がある。

通信ネットワークでは、次のような故障の発生例がある。

(1) 宛先情報テーブル故障による主信号断

図 7.2 に、伝送装置の宛先アドレスのソフトエラーによる主信号断の概略説明図を示す。NE1(NE はネットワークエレメントの略称)の宛先アドレステーブルでソフトエラーが発生すると、NE1 から送出されるパケットに誤ったアドレスが付与される。NE2 は、正しいアドレスを読み込むことができず、パケットを誤った宛先に送信するか破棄してしまう。その結果、主信号は断となる。

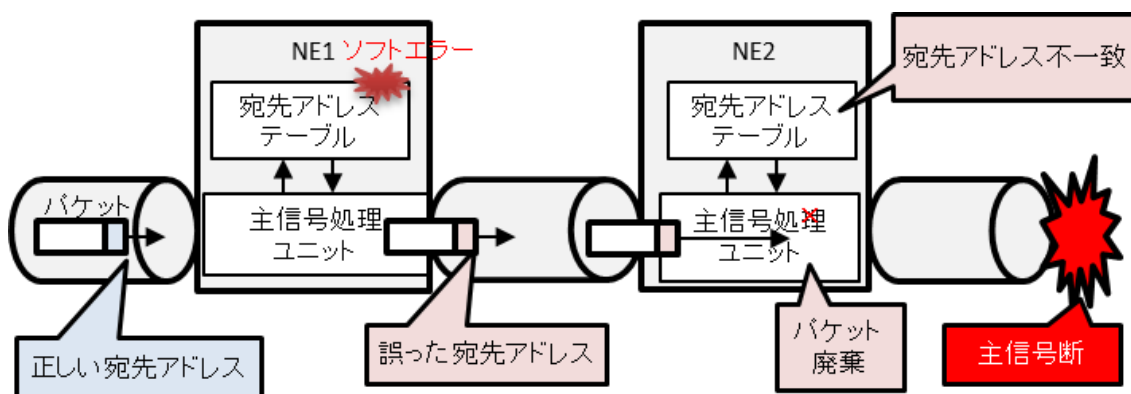


図 7.2 宛先アドレステーブル故障による主信号断

(2) 帯域制御テーブル故障による主信号断

図 7.3 に、伝送装置の帯域制御テーブルのソフトエラーによる主信号断の概略説明図を示す。帯域制御テーブルにソフトエラーが発生すると、主信号処理ユニットの帯域が不十分な値に設定されユニット内で主信号が遮断される。

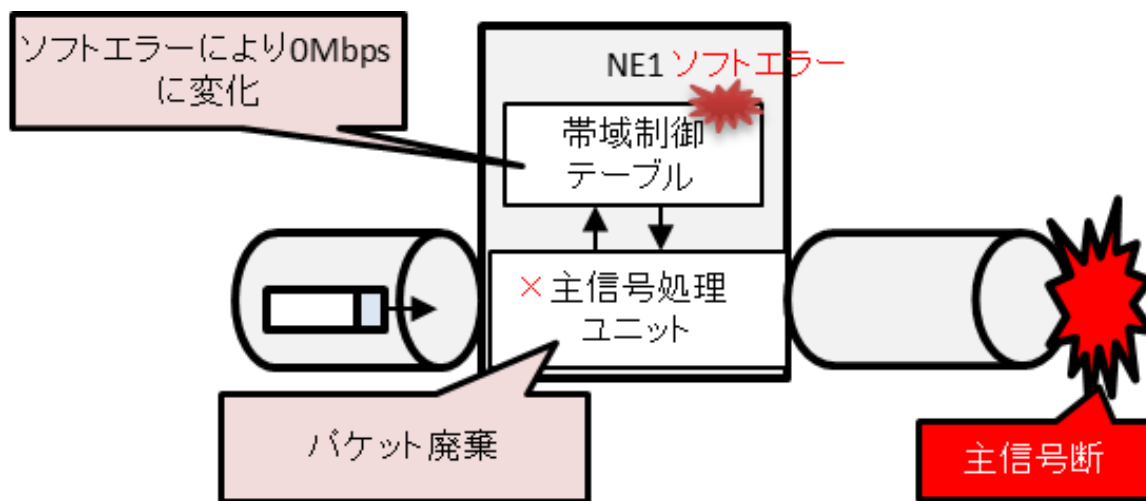


図 7.3 帯域制御テーブル故障による主信号断

(3) FPGA 内 CRAM 故障による主信号断

図 7.4 に、伝送装置の FPGA 内 CRAM のソフトエラーによる主信号断の概略説明図を示す。主信号処理ユニット B でソフトエラーが発生しパケット送出が止まる。そのユニットは故障監視されておらず警報通知がない。

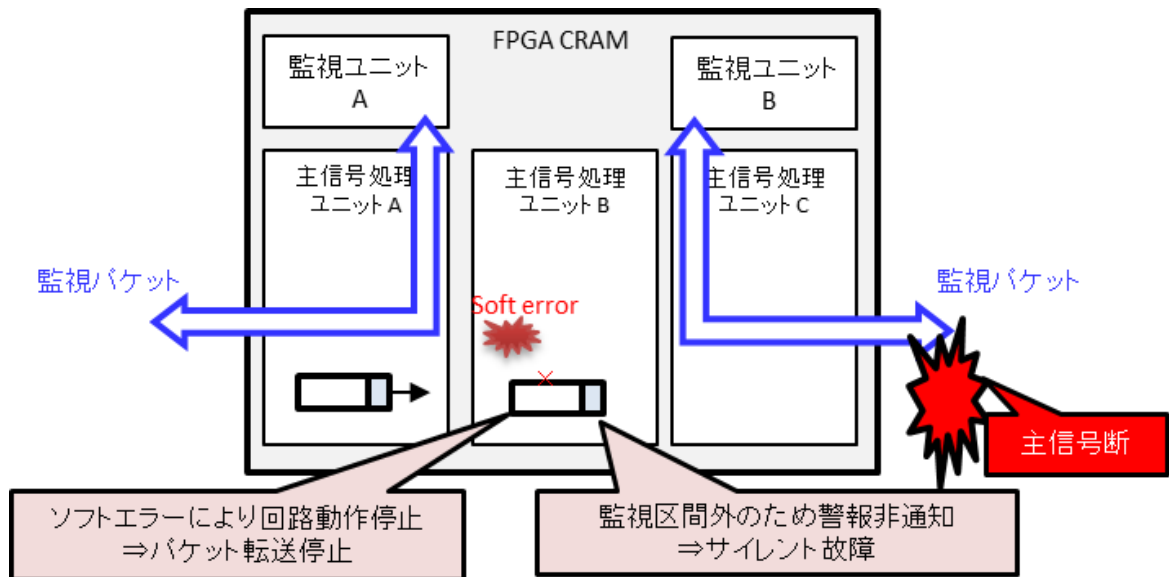


図 7.4 FPGA 内 CRAM 故障による主信号断

(4) CPU キャッシュメモリ故障による装置非監視状態

図 7.5 に、ソフトウェアにより引き起こされる装置非監視状態の概略説明図を示す。NE 内の CPU でソフトウェアが発生すると、NE と保守システム間の信号接続が断となり、NE が非監視状態となる。

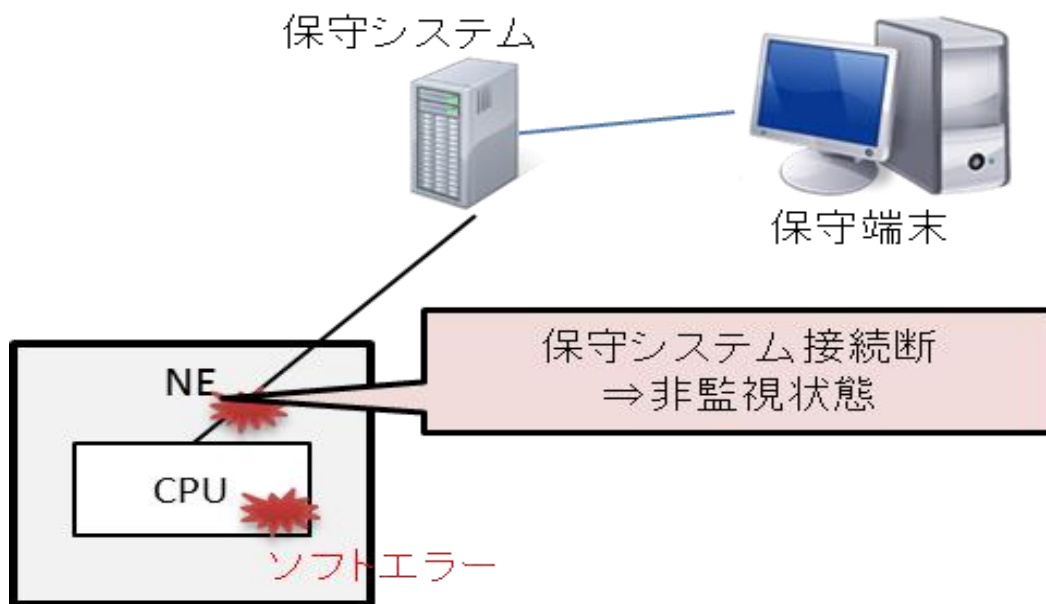


図 7.5 CPU キャッシュメモリ故障による装置非監視状態

7.3 通信装置のソフトウェア対策

ソフトウェアの対策手法は、(1) 低減、(2) 隔離、(3) 訂正の 3 つに分類できる。

(1) 低減

ソフトウェア低減対策は、ソフトウェア発生そのものを抑制するものである。下記に例を示す。

- 半導体デバイスと異なる粒子放射線の影響を受けない磁性体材料等のデバイスを使用する
- 3次元構造として、中性子によって生成される電荷が蓄積するドレインとシリコン基板間の空乏層の領域を縮小することでソフトウェア発生率を減少させる
- 高速イオンがシリコンに衝突して発生する電荷をダミーのインバータ回路で吸収させる RCC 技術を適



用する

- 粒子放射線の影響を受けやすい SRAM の装置内使用量を少なくする

## (2) 隔離

ソフトウェア隔離対策は、ソフトウェアが発生した部位の動作を他の部位で補完することでシステムへの影響を回避するものである。以下に例を示す。

- TMR として知られる三重化回路構成とし、エラーが発生した回路を他の 2 回路から切り離す
- メモリをインタリーブ構成とし MCU の影響を軽減する
- 機能影響の有無を識別し機能影響のないソフトウェアは無視する

## (3) 訂正

ソフトウェアは半導体デバイス自体が壊れるのではなく保持しているデータの一部のビットが反転してしまうという事象である。したがって、ソフトウェア発生個所に対し正常データの上書きや初期設定により訂正し正常復旧させるソフトウェア訂正対策は、一つの効果的な対策である。これらの上書きや初期設定を行う契機として次の 3 つの手段がある。

- 半導体デバイスに組み込まれた自律訂正機能
- 装置の制御プログラムと連携した装置自律訂正機能
- 保守者による手動操作

ハードウェアで実現している自律訂正機能としては、メモリ回路に対する ECC、論理回路のラッチ内部で発生したソフトウェアを補償する DICE 構造の適用がある。

手動操作は、保守者がソフトウェアの影響自身より訂正や初期設定の影響が小さいと判断したときに実施されるもので、本手段のみが保守品質に影響する。これに対し、装置の制御プログラムが自律でソフトウェア訂正動作を実行するものは、保守品質への影響はない。

いずれの訂正対策もソフトウェア発生検出と訂正の 2 段階で行うことになる。

## 8. ソフトエラーに対する標準の必要性

7 章で述べた様に、ソフトウェアの発生は急増しつつある。半導体デバイスにソフトウェア対策も存在するが、半導体デバイス自体のソフトウェア発生を完全に防ぐことはできない。そのため、通信装置のソフトウェア対策を講じるには、通信装置を構成する各半導体デバイスのソフトウェアに対する特性を把握し、デバイス、装置、システムレベルにおいて適用すべきソフトウェア対策を決定する必要がある。

ソフトウェアは通信装置 1 台あたりで見れば数年～数十年に 1 回程度しか発生しないため、導入台数が少ないにも関わらず過度にソフトウェア対策を講じる必要はない。しかし、数千台の通信装置でネットワークを構成した場合は、ネットワーク全体で 1 日に数回ソフトウェアが発生してしまう可能性もある。そのため、通信装置の仕様検討段階で導入台数やサービス品質を考慮に入れソフトウェアに対する品質基準を定め、その品質基準を達成するように設計段階でソフトウェア対策を講じる必要がある。

また、ソフトウェアは通常環境で再現させるには非常に長い時間が必要であり、ソフトウェア対策の効果を評価するための代替手段が必要である。装置に接続された外部制御回路から半導体デバイスにエラーを注入しソフトウェア試験を行う機能を有する装置もある。このような機能は、[ITU-T K-Sup.11]でエラー挿入機能として参照されている。粒子加速器により数分間でデバイスにソフトウェアを発生させることも可能である。

デバイスや装置に適用する対策を決定する前に、ソフトウェア対策動作の正常性を確認する必要がある。そのため、エラー挿入試験機能や粒子加速器を用いた装置レベルのソフトウェア試験が必須である。

上述した状況を考慮すると、ソフトウェアに対する設計手法、品質基準および試験方法を含む標準の制定が必要である。試験方法や要求基準を標準化することは、仕様を明確化が可能となり、製造ベンダと事業者の双方にとってマーケティングや調達を行うにあたり有用である。

## 9. 通信装置の開発手順

図 9.1 に通信装置の各開発段階におけるソフトウェア対策に関する検討内容の詳細を示す。

はじめに、仕様検討段階において提供サービスの要求品質、信頼度および導入数量を考慮し装置の要求品質を定めることを推奨する。ソフトウェア品質は、[JT-K139]に従いサービス品質クラスや保守品質クラス等を選択することにより決められる。

次に、初期の設計段階において机上で装置のソフトウェア発生率を見積もることを推奨する。そして、前記信頼度規定クラスに適合するための対策を講じて、その設計に対し発生率を机上で見積もる。要求信頼度規定クラスに適合するまで、対策の追加および机上見積もりを行う。設計法の詳細は [JT-K131]に記載されている。

最終的に、試験段階において、実機を用いて半導体ベンダツールによるエラー挿入試験や [JT-K130]記載の加速器中性子源による中性子照射試験を行いソフトウェア品質の評価を行うことを推奨する。品質評価法の詳細は [JT-K138]に記載されている。

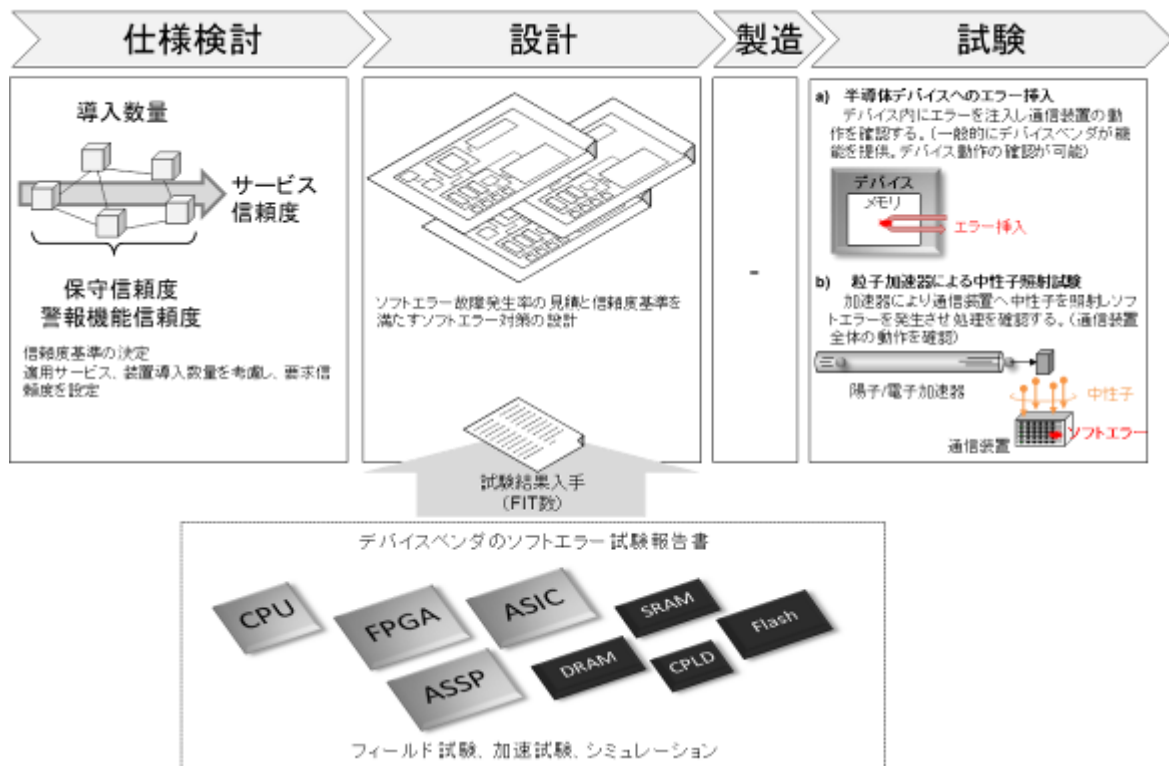


図 9.1 装置開発段階におけるソフトウェア対策導入手順

## 参考文献

[b-IEEE-1] Iwashita, Funatsu, et al., (2020), *Energy-Resolved Soft-Error Rate Measurements for 1-800 MeV Neutrons by the Time-of-Flight technique at LANSCE*. IEEE Transactions on Nuclear Science, 67(11), 2363-2369

[b-JEDEC] JEDEC standard JESD89A, *Measurement and Reporting of Alpha Particle and Terrestrial Cosmic Ray-Induced Soft Errors in Semiconductor Devices*.

[b-Moscow] Moscow Neutron Monitor Center. <http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/main.htm>

[b-SILS] *Sunspot Index and Long-term Solar Observations*. <http://www.sidc.be/silso/datafiles>

[b-XILINX1] UG116, b10.2.1 (2015), *Device reliability report*.

[http://japan.origin.xilinx.com/support/documentation/user\\_guides/ug116.pdf](http://japan.origin.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug116.pdf)

[b-XILINX2] WP395, v1.1 (2015), *Mitigating Single-Event Upsets*.

[http://www.xilinx.com/support/documentation/white\\_papers/wp395-Mitigating-SEUs.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp395-Mitigating-SEUs.pdf)